

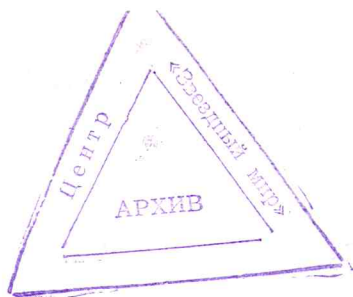
Советский фонд мира
Центр „Звездный мир“

Сверхпроводимость
для создания тяги
и подвес ротора ОТС

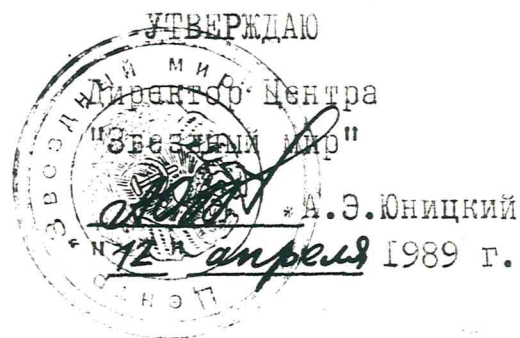
Руководитель темы
ОМЕЛЬЯНЕНКО В.И.

Харьков-Гомель

1989



ЦЕНТР "ЗВЕЗДНЫЙ МИР"



О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ
ТЯГИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА РОТОРА ОБЩЕПЛАНЕТНОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Руководитель
работы

В.И.Омельяненко В.И.Омельяненко

Харьков 1989

РЕФЕРАТ

Отчет 160 стр., 34 рисунка, 10 графиков, 7 таблиц,
70 источников

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДВЕС, СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ОБМОТКА ВОЗБУ-
ЖДЕНИЯ, ЛИНЕЙНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ТИРИСТОРНЫЙ
КОММУТАТОР

Объект исследования - тягово-левитационная система ротора об-
щепланетного транспортного средства.

Цель работы - анализ возможности создания тягово-левитацион-
ной системы, использующей для генерирования магнитного поля возбу-
ждения сверхпроводящие обмотки.

Метод исследования - математическое моделирование переходных
процессов в системе электродинамической подвески ротора и в линей-
ном двигателе постоянного тока с тиристорным коммутатором на ЭВМ.

Полученные результаты и новизна - предложена оригинальная
конструкция якорных катушек электродинамической системы подвеса
ротора, исследованы скоростные характеристики ее левитационных па-
раметров. Получены силовые и энергетические параметры тягового дви-
гателя.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Перечень условных обозначений, символов, единиц и терминов	6
Введение	9
I. Способы магнитного подвеса и виды электродвигателей, которые потенциально могут быть использованы в общепланетном транспортном средстве	
I.1. Магнитная сила . . . . .	.12
I.2. Магнитный подвес . . . . .	.12
I.2.1. Подвес с помощью постоянных магнитов . . . . .	.13
I.2.2. Электромагнитный подвес . . . . .	.15
I.2.3. Электродинамический подвес . . . . .	.18
I.3. Электродвигатели для привода ротора ОТС	
I.3.1. Основные требования и особенности . . . . .	.27
I.3.2. Асинхронный двигатель . . . . .	.29
I.3.3. Синхронный двигатель . . . . .	.33
I.3.4. Коммутаторный двигатель постоянного тока . . . . .	.37
I.4. Основной вывод . . . . .	.39
2. Системы тяги и электродинамического подвеса, использующие сверхпроводящие обмотки возбуждения . . . . .	.41
2.1. Классификация линейных двигателей со сверхпроводящим индуктором и устройств электродинамической подвески . . . . .	.43
2.2. Обзор национальных исследовательских программ в области высокоскоростного наземного транспорта на электродинамическом подвесе	
2.2.1. Исследовательские программы США . . . . .	.62
2.2.2. Япония: опыт создания линейных электро-механических преобразователей энергии со сверхпроводящими обмотками возбуждения на полигоне пассажирского ВСНТ в Миядзаки . . . . .	.73
2.2.3. Кольцевой испытательный полигон в Эрлангене . . . . .	.78
2.2.4. Проекты транспортных систем на электродинамическом подвесе, разработанные в Англии и Канаде . . . . .	.81
2.3. Выводы . . . . .	.82
3. Выбор схемы электродинамического подвеса ротора ОТС	
3.1. Поезда на магнитной подушке и ОТС: черты сходства и различия . . . . .	.85

3.2. "Идеальный" цикл разгона ротора ОТС	89
3.3. Схема предлагаемой тягово-левитационной системы для ОТС	95
3.4. Выводы	101
4. Исследование рабочих характеристик электродинамической системы подвеса ротора ОТС	102
4.1. Показатели качества и рабочие характеристики систем электродинамического подвеса	103
4.2. Исследование магнитных связей между обмотками возбуждения и якорными контурами - основа расчета силовых и энергетических характеристик системы подвеса . .	106
4.3. Скоростные характеристики первого этапа цикла разгона ротора	126
4.4. Скоростные характеристики второго и третьего этапов цикла разгона	132
4.5. Выводы	134
5. Двигатель постоянного тока с тиристорным коммутатором и сверхпроводящей ОБ для привода ротора ОТС	
5.1. Исходные данные и главные размеры	135
5.2. Параметры обмотки якоря	137
5.3. Тиристорный коммутатор	140
5.4. Выводы	142
6. Современное состояние высоко- и проблемы высоко- температурной сверхпроводимости	144
Заключение	153
Список литературы	155

Перечень условных обозначений,
символов, единиц и терминов

- ВСНТ – высокоскоростной наземный транспорт;
 КССТН – комбинированная система синхронной тяги и направления;
 ЛАД – линейный асинхронный двигатель
 ЛДПТ – линейный двигатель постоянного тока;
 ЛСД – линейный синхронный двигатель;
 ЛЭД – линейный электродвигатель;
 ЛЭМПЭ – линейный электромеханический преобразователь энергии;
 МДС – магнитодвижущая сила;
 ОВ – обмотка возбуждения;
 ОТС – общепланетное транспортное средство;
 РП – рельсовая пушка;
 СПЧ – статический преобразователь частоты;
 СПОВ – сверхпроводящая обмотка возбуждения;
 ТК – тиристорный коммутатор;
 ЭДП – электродинамический подвес;
 ЭДС – электродвижущая сила;
 ЭМП – электромагнитный подвес;
 ЯК – якорная катушка;
 a – ускорение;
 B – индукция магнитного поля;
 B_N – нормальная составляющая индукции;
 B_T – тангенциальная составляющая индукции;
 C – геометрическая постоянная двигателя;
 D – диаметр ротора ОТС;
 E – энергия;
 e – ЭДС;
 F – механическая сила;
 f – частота;
 F_d – сила торможения (*drag force*);

- F_L - сила подъема (*levitation force*);
 F_{LM} - удельная /в расчете на единицу массы магнита/ сила подъема;
 F_{LS} - удельная /в расчете на единицу площади поперечного сечения полюса магнита/ сила подъема;
 F_P - сила тяги (*propulsion force*);
 F_Z - боковая восстанавливающая сила (*restoring force*);
 F_{Zp} - сила отталкивания (*repulsion force*);
 H - зазор между ротором и статором ОТС;
 h - толщина;
 g - ускорение свободного падения;
 G - вес тела;
 \bar{I}_g - вихревой ток в статорной катушке системы ЭДП;
 \bar{I}_i - индуцированный /наведенный/ вихревой ток;
 \bar{I}_s - ток в СПОВ;
 $\bar{I}_я$ - ток якоря ЛДПТ;
 \bar{I}_2 - ток вторичной обмотки ЛАД;
 K_z - жесткость системы подвеса;
 L_g - индуктивность статорной катушки системы ЭДП;
 L_s - индуктивность СПОВ;
 m - число фаз якорной обмотки двигателя;
 M^* - удельная /в расчете на погонный метр/ масса ротора;
 M_{sg} - коэффициент взаимоиנדукции между СПОВ и ЯК;
 P - мощность;
 p - число пар полюсов;
 P_g - мощность, диссипируемая в ЯК подвеса;
 $P_{пстр.}$ - потребляемая мощность;
 $P_{разв.}$ - развиваемая мощность;
 R_g - активное сопротивление катушки;
 $R_{чз}$ - удельная мощность потерь во вторичном элементе;
 Q - тепловыделения;
 S - площадь полюсных наконечников;

- s - скольжение;
 T - период колебаний;
 t - время;
 $t_{\text{ком}}$ - время коммутации одной секции якоря;
 U - напряжение на зажимах обмотки;
 V - скорость ротора /линейная/;
 V_c - синхронная скорость;
 x, y, z - оси декартовой системы координат;
 X_g - индуктивное сопротивление катушки подвеса;
 Z_g - полное сопротивление катушки подвеса;
 μ - магнитная постоянная;
 μ_c - относительная магнитная проницаемость;
 Φ_c - магнитный поток катушки;
 η - коэффициент полезного действия;
 $\cos \varphi$ - коэффициент мощности асинхронного двигателя;
 θ - угол нагрузки синхронного двигателя;
 τ - полюсное деление обмотки двигателя;
 σ - электрическая проводимость;
 ω - угловая частота;
 γ - левитационное качество.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня вряд ли у кого-нибудь вызовет возражение то, что для дальнейшего увеличения масштабов исследовательских программ, направленных на изучение и освоение околоземного космического пространства, необходимо создавать принципиально новые транспортные системы, обладающие по сравнению с эксплуатируемыми в настоящее время ракетно-космическими средствами более высокой эффективностью и наносящие меньший вред окружающей среде. Одно из альтернативных направлений прогресса в данной области - замена химической тяги электромагнитной. Успехи, достигнутые за последние 30 лет в разработке линейных тяговых электродвигателей и устройств бесконтактной магнитной подвески для высокоскоростного наземного транспорта, послужили толчком к появлению различных предложений по совершенствованию имеющихся и разработке новых способов заброски грузов на околоземную орбиту. Наиболее интересные из них - идея создания электромагнитной катапульты, способной разгонять ускоряемое тело до скорости порядка 8 км/с, и идея вывода в космос грузов при помощи расширяющегося под действием центробежных сил ротора общепланетного транспортного средства ОТС [1].

Ротор ОТС, замкнутый в кольцо по экватору Земли, предварительно разгоняют при помощи ЛЭД внутри вакуумированного канала. Для предотвращения касаний ротором стенок вакуумной оболочки, а также для удержания его в полости статора до момента достижения скорости 10 км/с планируется использовать одну из схем магнитного подвеса.

Целью настоящей научно-исследовательской работы является анализ возможности создания тягово-левитационной системы ротора ОТС, использующей для генерирования магнитного поля возбуждения сверхпроводящие обмотки.

В процессе решения этой задачи в работе рассмотрены следующие вопросы:

- обоснована принципиальная возможность достижения бесконтактной подвески ротора в интервале изменений его скорости $10^2 - 10^4$ м/с. Из трех видов магнитного подвеса и трех типов линейных тяговых двигателей предпочтение отдано сочетанию электродинамической подвесной системы с линейным коммутаторным двигателем постоянного тока;

- на основе сопоставления структурных и функциональных особенностей тягово-левитационных систем ОТС и высокоскоростного наземного транспорта установлено, что ВОНТ на электродинамическом подвесе является ближайшим техническим аналогом ОТС. Проведен анализ современного состояния и достижений в области создания высокоскоростных скипажей на магнитной подушке в СССР и за рубежом;

- выдвинут критерий для оценки эффективности работы системы подвеса ротора - интегральные потери мощности во вторичном элементе на протяжении цикла разгона. Рассмотрены варианты структурной организации и последовательности работы подсистем ТЛС;

- на основании анализа технических проблем обеспечения работоспособности ТЛС сделан вывод о целесообразности размещения СПОВ на роторе, а якорных катушек тягового двигателя и системы подвеса - на статоре и вакуумной оболочке ротора;

- предложена оригинальная конструкция двухпетлевых короткозамкнутых катушек якоря, образующих совместно со СПОВ нульпоточную систему электродинамического подвеса. Выполнена оценка минимальной величины магнитодвижущей силы СПОВ, необходимой для обеспечения подвески ротора;

- определена зависимость удельных потерь мощности во вторичном элементе системы подвеса от скорости ротора при различных значениях удельного расхода материала проводника якорных катушек;

- выбраны геометрические размеры и электромагнитные параметры линейного двигателя постоянного тока с тиристорным коммутатором и сверхпроводящими обмотками возбуждения для привода ротора ОТС;

- изложено современное состояние сильноточной и приведены проблемы высокотемпературной сверхпроводимости.

Работа выполнялась по заданию центра НТТМ "Звездный мир" творческим коллективом в составе Омеляненко В.И., Гончаренко Л.В., Кудиной Н.В. и Сергеева С.А.

1. СПОСОБЫ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА И ВИДЫ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛЕЙ, КОТОРЫЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО МОГУТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНЫ В ОБЩЕПЛАНЕТНОМ ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ

1.1. Магнитная сила

Для бесконтактного подвеса и привода ротора ОТС предполагается использовать электромеханический преобразователь энергии, в котором механическое усилие возникает вследствие лоренцевского взаимодействия тока с магнитным полем.

Ток можно создать различными способами:

- транспортный ток в проводнике;
- индуцированные постоянным магнитным полем токи в ферромагнитном материале или переменным полем в диамагнитном проводнике;
- амперовы токи в постоянном магните.

Магнитную силу можно рассматривать как магнитное давление, подобное давлению сжатого газа в замкнутом объеме. Магнитная индукция в $I T$ соответствует магнитному давлению около $4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, что примерно равно давлению в шинах автобуса.

При использовании в качестве источника поля постоянного магнита сила может иметь характер как притяжения, так и отталкивания. Сила взаимодействия между источником магнитного поля и ферромагнетиком всегда является силой притяжения, в то время как диамагнитный металл и источник переменного магнитного поля всегда отталкиваются. В случае двух металлических проводников, несущих ток, сила может быть как силой притяжения, так и силой отталкивания.

1.2. Магнитный подвес

Известны системы магнитного подвешивания трех основных типов: с помощью постоянных магнитов, электромагнитная и электродинамическая. Кроме того, встречаются различные варианты комбинаций этих трех основных типов.

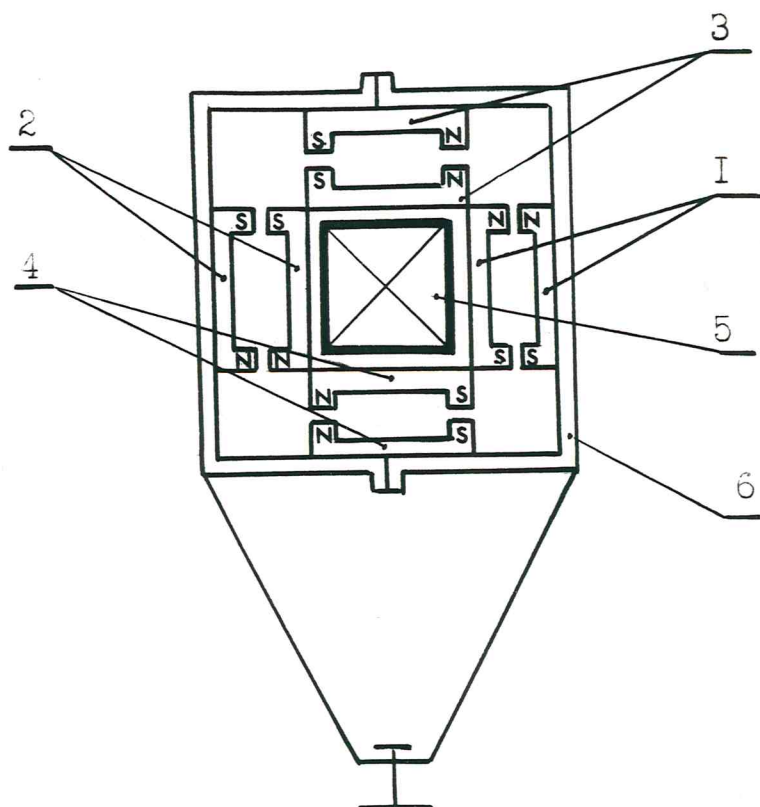
1.2.1. Подвес с помощью постоянных магнитов (ПМ)

Подвес с помощью постоянных магнитов основан на использовании силы отталкивания одноименных полюсов магнита. Для этой цели на наружной поверхности ротора ОТС и внутренней поверхности оболочки должны быть установлены постоянные магниты, как это показано на рис. 1.1. Пары магнитов 3 и 4 обеспечивают вертикальный подвес, а пары магнитов 1 и 2 - горизонтальную стабилизацию. Использование для этих целей силы притяжения разноименных полюсов нецелесообразно, так как такая система принципиально неустойчива - при увеличении зазора сила притяжения падает, а при уменьшении растет. И то, и другое может привести к исчезновению бесконтактного подвеса. Дело в том, что при изменении зазора для поддержания магнитного подвеса необходимо изменять силу взаимодействия магнитов. При использовании для создания магнитного поля только постоянных магнитов такие изменения невозможны.

Системы подвешивания на постоянных магнитах по принципу отталкивания были разработаны фирмами *Westinghouse* в США и *Polgreen* в Великобритании. Фирма *Polgreen* [2] разработала проект подвеса для наземной транспортной системы, в соответствии с которым элементы представляют собой U-образные стальные каналы, в которые закладываются бруски высококоэрцитивного бариевого феррита. Одно звено такого элемента имеет следующие параметры: длина 9,15 м, ширина - 15,3 мм, высота 57 мм, масса 340 кг (2/3 массы приходится на феррит). Подъемная сила одного метра длины такого элемента составляет 1860 N при величине зазора 9,5 мм. С уменьшением зазора величина подъемной силы растет и при соприкосновении оказывается примерно вдвое больше, чем при зазоре 9,5 мм.

Наилучшими удельными показателями обладают освоенные промышленностью самарий-кобальтовые магниты из сплавов SmCo_5 . Они имеют следующие физические характеристики:

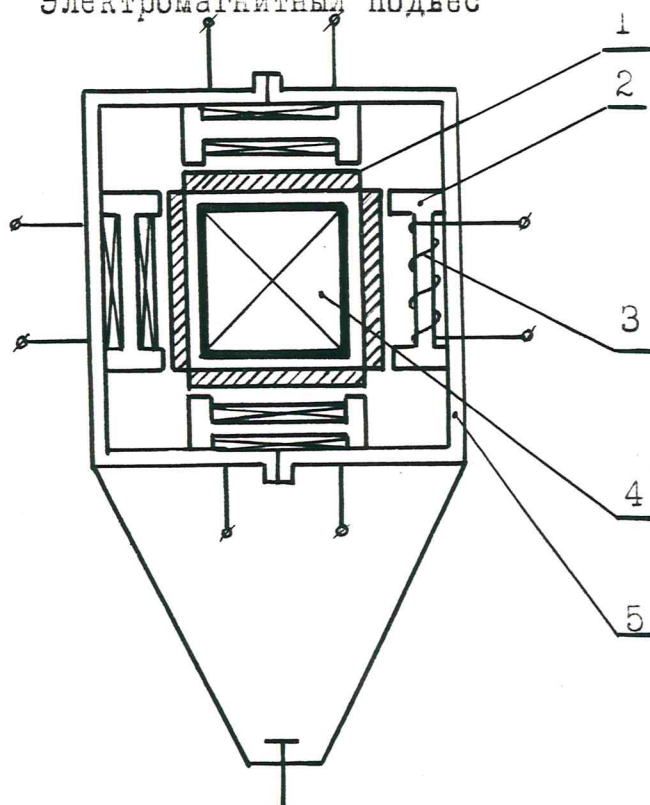
Подвес на постоянных магнитах



1,2 - магниты горизонтальной стабилизации; 3,4 - магниты подвеса; 5 - ротор ОТС; 6 - оболочка ОТС

Рис. 1.1

Электромагнитный подвес



1 - ферромагнетик; 2 - сердечник магнита; 3 - обмотка; 4 - ротор ОТС; 5 - оболочка ОТС.

Рис. 1.2

Остаточная индукция	0,8 ÷ 0,95 Тл
Коэрцитивная сила	500 ÷ 600 кА/м
Удельная магнитная энергия	160 кДж/м ³
МДС	20 кА
Плотность	8 ÷ 8,5 · 10 ³ кг/м ³
Цена	100 руб/кг

Эти магниты не размагничиваются при значительных воздушных зазорах и их малой длине в направлении легкого намагничивания, т.е. они могут выполняться в виде тонкого слоя 20 ÷ 30 мм с большой площадью полюса и отдачей максимальной энергии (ВН) мах в окружающее пространство (при $H = 10 \div 15$ мм $B = 0,25 \div 0,15$ Тл).

Однако очевидно, что этой энергии недостаточно для подвеса ротора относительно оболочки с зазором, обеспечивающим надежную работу ОТС (порядка нескольких десятков миллиметров). Высокое значение удельной плотности материала постоянных магнитов также является существенным препятствием на пути использования этого типа подвеса в ОТС. К подобным выводам пришли и разработчики высокоскоростных наземных транспортных средств на магнитной подушке. Так, в [3] приводятся значения силы на единицу площади поперечного сечения полюса магнита F_{LS} и силы, приходящейся на единицу массы магнита F_{LM} , которые для натурального экипажа должны быть $F_{LS} > 100 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}$, $F_{LM} > 100 \text{ Н/кг}$. В системах с постоянными магнитами эти величины находятся на уровне 20 кН/м² и 60 кг/н. Н. Kolm на модели 1/25 Magneplane длиной 1 м и массой 14 кг провел испытания как со сверхпроводящими магнитами, так и с самарий-кобальтовыми. Эти испытания показали, что даже в случае масштабной модели замена сверхпроводящих магнитов самарий-кобальтовыми привела к увеличению массы экипажа на 20 %, в то время как магнитный поток составил лишь 80 % магнитного потока сверхпроводящего варианта.

1.2.2. Электромагнитный подвес (ЭМП)

ЭМП базируется на использовании сил притяжения электромаг-

нитов с ферромагнетиками. Для этого ротор ОТС необходимо выполнить из ферромагнитного материала, а на оболочке расположить электромагниты, питаемые от источника электрической энергии (рис. I.2.). Размещение на роторе электромагнитов нецелесообразно, так как при этом возникает проблема передачи к ним питающей энергии. Принципиальная схема узла ЭМП представлена на ^{рис. I.3} рис. I.3. Обмотка возбуждения электромагнитов питается током через быстродействующую систему управления по сигналам датчиков, контролирующих зазор между ферромагнетиком ротора и электромагнита.

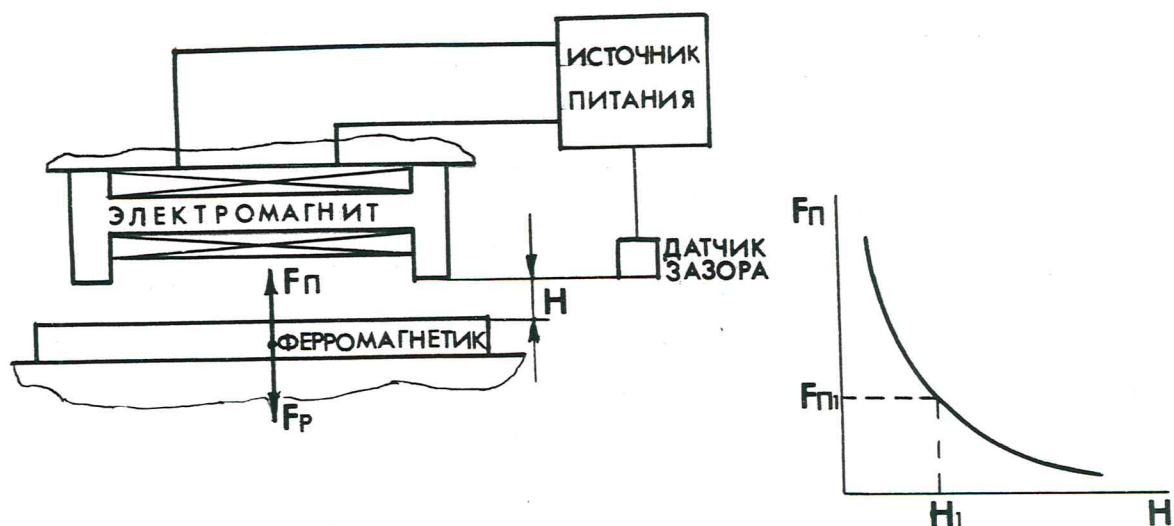
При перемещении относительно электромагнитов ферромагнетика ротора ОТС в нем наводятся вихревые токи, создающие магнитный поток, размагничивающий основной магнитный поток, созданный электромагнитами. Возникающая при этом сила F может быть разложена на тормозную F_d , направленную против направления движения ротора, и отталкивающую F_{rep} , направленную против силы подвеса F_L . С ростом скорости движения ротора влияние вихревых токов может достигнуть существенной величины, и поэтому с ним борются применением ферромагнитных сталей с повышенным содержанием кремния и шихтовкой. Диаграмма взаимодействия сил в системе ЭМП показана на рис. I.4. Компенсация отталкивающей силы F_{rep} должна определяться системой управления путем соответствующего увеличения тока в обмотке электромагнита, а тормозной силы F_d - соответствующим увеличением тягового усилия линейного двигателя.

Сила подвеса в устройстве ЭМП определяется по известной формуле

$$F_L = \frac{B^2 \cdot S \cdot K_B}{2 \mu_0} \quad (I.I.)$$

где B - индукция магнитного поля в зазоре, S - площадь полюсных наконечников, K_B - коэффициент, учитывающий выпучивание магнитного потока, принимается равным $1,2 \div 1,5$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная постоянная.

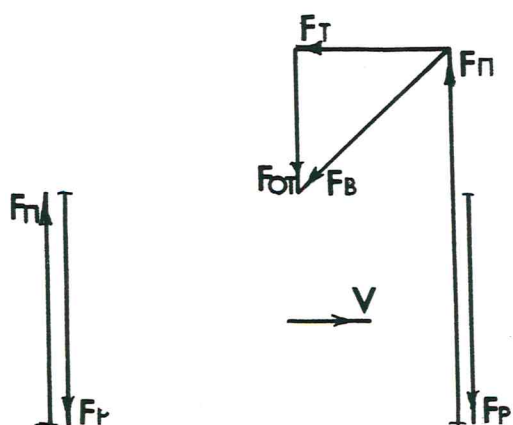
Электромагнитный подвес



F_n - сила подвеса; F_p - нагрузки, действующие на ротор ОТС;
 H - зазор.

Рис. 1.3

Диаграмма взаимодействия сил ЭМП



F_T - тормозная сила; $F_{от}$ - отталкивающая; $F_в$ - возникающая

Рис. 1.4

График функции, определяющий зависимость тормозной силы от скорости

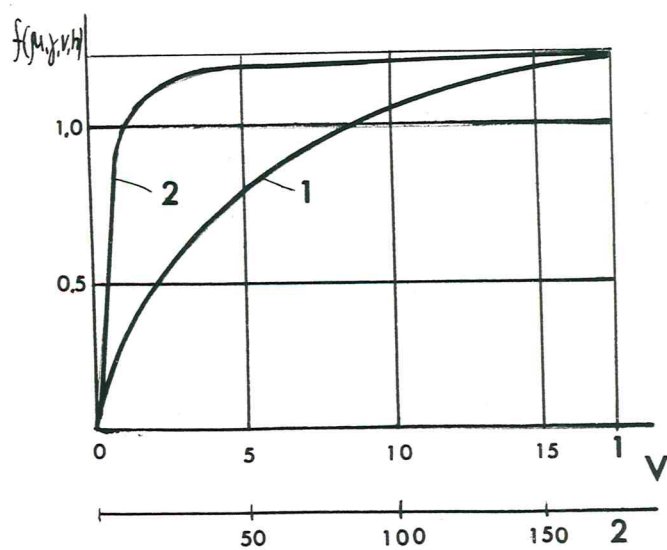


Рис. 1.5

Сила торможения

$$F_d = \frac{32 \cdot K \cdot l \cdot h \cdot B^2}{\mu_a \cdot \pi^2} f(\mu_a, \sigma, v, h) \quad (1.2.)$$

где K - число отдельных стальных листов ферромагнетика ротора, $2h$ - толщина каждого листа, l - ширина активной части ферромагнетика, μ_a - абсолютная магнитная проницаемость материала ротора, σ - электрическая проводимость, $f(\mu_a, \sigma, v, h)$ - безразмерная величина, зависимость которой от скорости приведена на рис.1.5.

Применению ЭМП для ОТС имеются следующие препятствия. Первое - это малая величина зазора (10-15 мм). Второе препятствие заключается в присущей этой системе неустойчивости при смещении ротора относительно оболочки.

Магнитная сила возрастает с уменьшением зазора и уменьшается при его увеличении. Таким образом, система с притяжением по существу неустойчива, она имеет "отрицательный" коэффициент упругости и для ее стабилизации применяется механизм обратной связи, регулирующий ток магнита. Эти два недостатка, если и не исключают движение ротора с высокой скоростью, то во всяком случае приводят к необходимости затрачивать большую мощность на поддержание требуемой величины зазора. И, наконец, третье препятствие - необходимость в питании обмоток возбуждения электромагнитов. Это препятствие не позволяет использовать систему ЭМП после схода оболочки и ротора ОТС с эстакады.

1.2.3. Электродинамический подвес (ЭДП)

1.2.3.1. Фундаментальные положения.

Согласно правилу Ленца, ток, индуцированный в проводящем контуре магнитным полем, направлен таким образом, чтобы сохранить постоянным магнитный поток. Магнитное поле индуцированного тока противоположно по направлению внешнему переменному магнитному полю и между магнитом и контуром возникает сила отталкивания.

Это явление можно представить следующим образом. На рис. I.6 а показаны силовые линии переменного магнитного поля, созданного петлей с током в определенный момент времени в отсутствие проводника. Если к петле приблизить проводник, силовые линии сжимаются (рис. I,6 в) и между петлей и проводником возникает магнитное давление. Заметим, что система с отталкиванием внутренне устойчива относительно смещений, так как сила отталкивания возрастает с уменьшением расстояния между петлей и проводником.

При данной величине магнитного поля индуцированный ток возрастает с увеличением частоты изменения поля, асимптотически насыщаясь при больших частотах. Насыщение достигается тогда, когда магнитное поле перестает проникать в проводник. Сила отталкивания, следовательно также возрастает с частотой, достигая затем своего предельного значения.

Один из важнейших вопросов системы с отталкиванием заключается в диссипации энергии вследствие конечной проводимости проводника контура. Как и индукционный нагрев, эта диссипация зависит от частоты изменения поля, достигая максимума на определенной частоте и спадая до нуля на высоких частотах.

Наиболее важная особенность системы с отталкиванием с позиции применения в ОТС состоит в возможности использования сверхпроводящих магнитов для создания требуемого магнитного поля. С помощью сверхпроводящих магнитов можно создавать сильное магнитное поле в большом объеме, что коренным образом сказывается на всей конструкции системы.

Рассмотрим систему отталкивания и диссипацию энергии в случае ротора ОТС (рис. I.7.) движущегося относительно оболочки, на которой размещены контура из диамагнитного материала, например алюминия (в дальнейшем будем эту часть называть "контур"). Ротор снабжен рядом сверхпроводящих магнитов (в дальнейшем "магнит"). В системе координат, движущейся вместе с ротором создаваемое магнитами

Переменное магнитное поле, созданное петлей с током, в
отсутствии (а) и при наличии (в) проводника

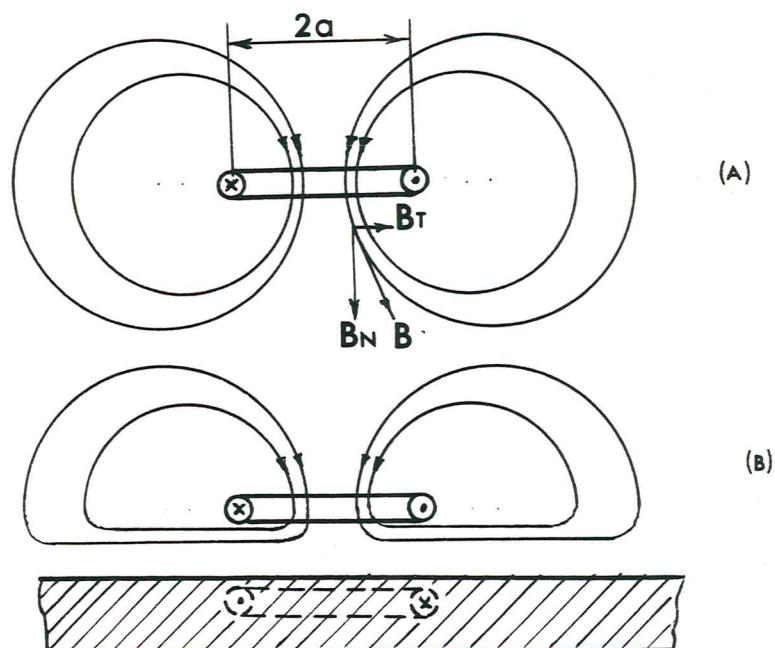
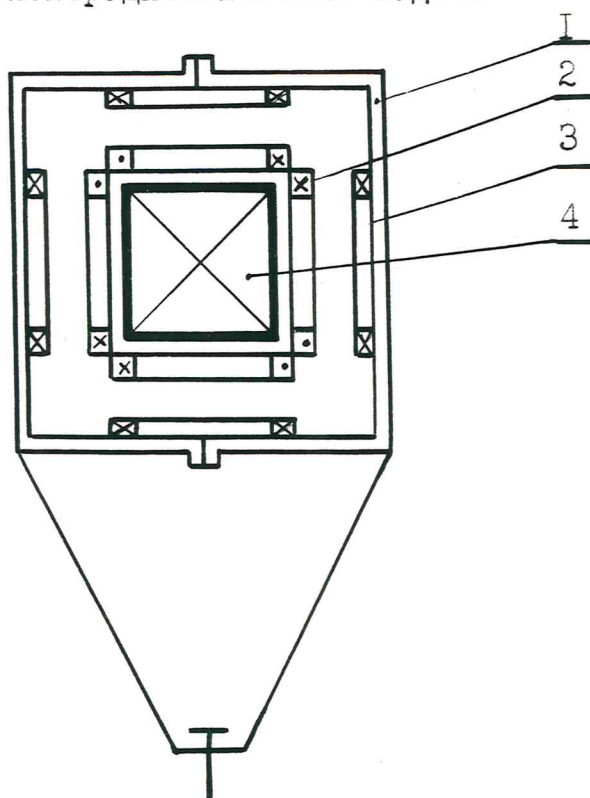


Рис. 1.6

Электродинамический подвес



1 - оболочка; 2 - сверхпроводящий магнит; 3 - немагнитный контур; 4 - ротор.

Рис. 1.7

магнитное поле постоянно, однако для фиксированной точки оболочки оно изменяется со временем. Таким образом, в результате движения ротора возникает сила отталкивания, которая и удерживает ротор относительно оболочки. Когда ротор неподвижен, подъемная сила равна нулю, поэтому точно так же, как и самолет, при малых скоростях движения ротор должен опираться на колеса. Диссипация энергии в контуре проявляется как сила сопротивления, поэтому для поддержания движения ротора требуется внешняя движущая сила.

Используя энергетический и полевой подход, выведем приближенные выражения подъемной силы и силы сопротивления в системе с отталкиванием на сверхпроводящих магнитах.

1.2.3.2. Энергетический подход

В соответствии с этим подходом сила определяется как производная от энергии, запасенной системой контуров, по которым протекает ток. Рассмотрим простой пример взаимодействия магнита и одного из контуров (рис. I.8.). Обозначим скорость ротора V . Введем следующие обозначения.

I_s - ток в сверхпроводящем магните, Φ_0 - полный магнитный поток в сверхпроводящем магните в состоянии покоя, M_{sg} - коэффициент взаимной индукции сверхпроводящего магнита и контура, R_g, L_g, I_g - соответственно, сопротивление, индуктивность и ток контура.

Вначале примем $R_g = 0$. Тогда электромагнитный процесс в системе магнит-контур опишется следующими уравнениями:

$$\begin{cases} L_s I_s + M_{sg} I_g = \Phi_0; \\ M_{sg} I_s + L_g I_g = 0. \end{cases} \quad (I.3.)$$

Решая эти уравнения относительно I_s и I_g , получаем

$$I_s = I_0 \cdot (1 - M_{sg}^2 / L_s L_g)^{-1}; \quad (I.4.)$$

$$I_g = - \frac{M_{sg}}{L_g} I_0 (1 - M_{sg}^2 / L_s L_g)^{-1}. \quad (I.5.)$$

Электродинамический подвес. Получение основных соотношений

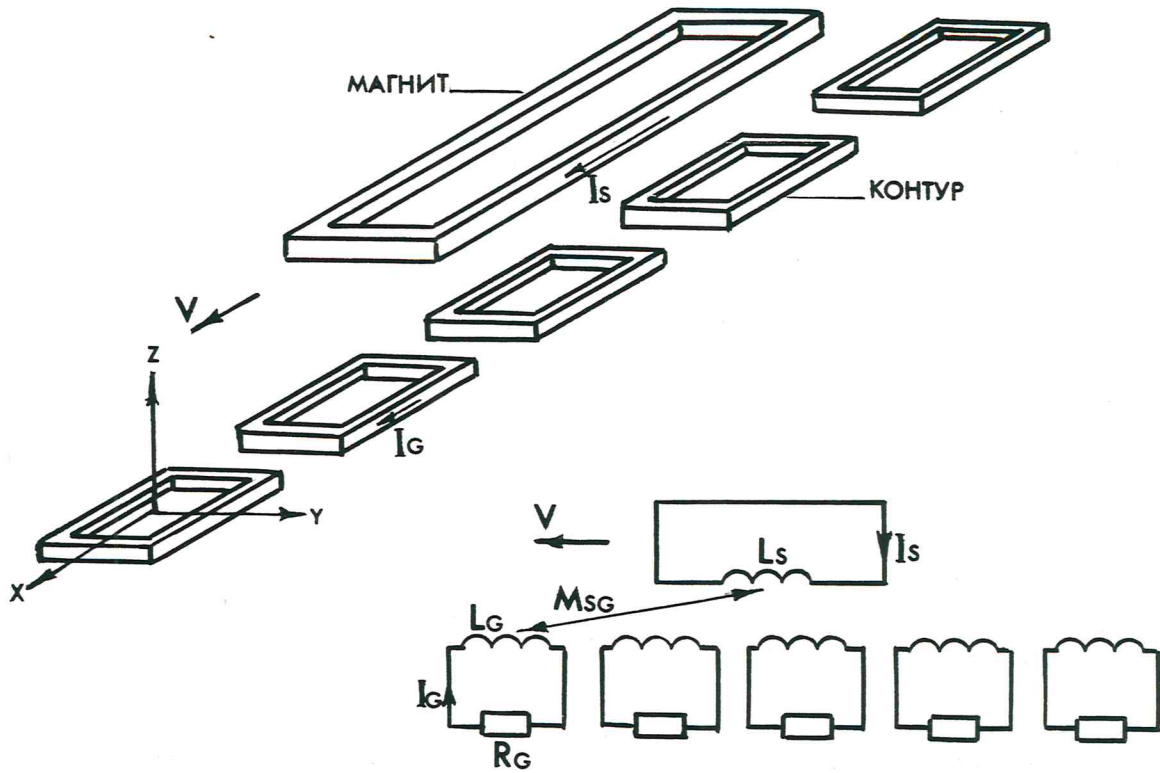


Рис. 1.8

Зависимость подъёмной
силы от скорости

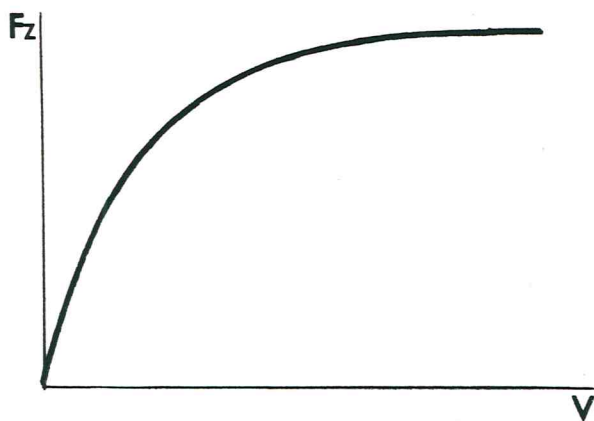


Рис. 1.9

Зависимость силы
торможения от скорости

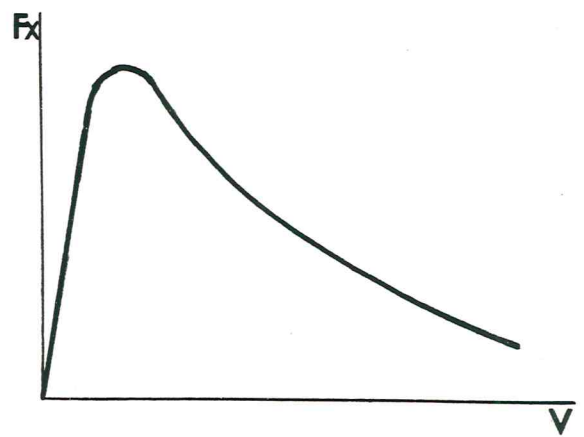


Рис. 1.10

где $\bar{I}_0 = \Phi_0 / L_s$ - первоначальный ток в сверхпроводящем магните при неподвижном роторе. Максимальный ток в сверхпроводящем магните равен $\bar{I}_0 \cdot (1 - M_{sg}^2 / L_s L_g)^{-1/2}$. Эта величина не должна превосходить критического значения.

Мгновенное значение полной энергии, запасенной в системе, определяется выражением

$$E = \frac{1}{2} L_s \bar{I}_s^2 + M_{sg} \bar{I}_s \bar{I}_g + \frac{1}{2} L_g \bar{I}_g^2. \quad (I.6.)$$

Подставляя выражение (I.4) и (I.5) в (I.6), получаем

$$E = \frac{L_s \bar{I}_0^2}{2} \frac{1}{1 - M_{sg}^2 / L_s L_g} \quad (I.7.)$$

Сила в направлении \vec{n} определяется выражением

$$\vec{F}_n = - \nabla_n E. \quad (I.8.)$$

И проекции силы на оси декартовой системы координат:

$$\begin{aligned} F_L &= - \frac{\bar{I}_0^2}{L_g} \frac{M_{sg}}{1 - M_{sg}^2 / L_s L_g} \cdot \frac{\partial M_{sg}}{\partial z}; \\ F_d &= - \frac{\bar{I}_0^2}{L_g} \frac{M_{sg}}{1 - M_{sg}^2 / L_s L_g} \cdot \frac{\partial M_{sg}}{\partial x}; \\ F_z &= - \frac{\bar{I}_0^2}{L_g} \frac{M_{sg}}{1 - M_{sg}^2 / L_s L_g} \cdot \frac{\partial M_{sg}}{\partial y}. \end{aligned} \quad (I.9.)$$

Из этих выражений очевидно, что силы, действующие на сверхпроводящую катушку, в значительной степени определяются величиной тока в сверхпроводящей катушке и производной от коэффициента взаимной индукции.

Рассмотрим, что происходит, когда R_g отлично от нуля. В этом случае сила подвеса уже зависит от скорости ротора. Допустим, что $\bar{I}_g, \bar{I}_s, L_g, L_s = \text{const}$, тогда

$$F_L = - \bar{I}_s \bar{I}_g \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} \quad (I.10.)$$

Значит, зависимость $F_L(v)$ определяется зависимостью $\bar{I}_g(v)$.

$\bar{I}_g(v) = e_g / z_g$. Э.д.с. в контуре e_g определяется в соответствии с законом электромагнитной индукции $e_g = - \frac{d\Phi}{dt}$

и пропорциональна скорости V . Полное сопротивление контура $Z_g = \sqrt{R_g^2 + X_g^2}$. Реактивная составляющая $X_g = 2\pi f L_g$ при больших скоростях преобладает над R_g и при $X_g \gg R_g$ полное сопротивление приблизительно пропорционально V . Следовательно при больших скоростях I_g , а следовательно и F_d практически не зависят от скорости. Как только скорость упадет до значения, при котором $R_g \gg X_g$, I_g и F_d уже будут зависеть от скорости практически в прямой пропорции. Зависимость силы подвеса от скорости для ЭДП приведена на рис. I.9.

Другой важной особенностью случая $R_g \neq 0$ является возникновение силы электромагнитного сопротивления. Когда контур обладает конечным сопротивлением, в нем во время движения ротора диссипируется мощность $P_g = I_g^2 R_g$, которую необходимо компенсировать за счет притока энергии к двигателю. Следовательно, $P_g = I_g^2 R_g = -F_d \cdot V$, где F_d — сила электромагнитного торможения. Она определяется как

$$F_d = - \frac{I_g^2 R_g}{V} \quad (\text{I. II.})$$

Её зависимость от скорости $F_d(V)$ определяется скоростью диссипации, зависящей от константы затухания L_g/R_g . Поэтому при данной величине L_g/R_g , чем быстрее перемещается магнит, тем меньше диссипируется энергия. Это означает, что, когда превышена определенная скорость, при которой индуцированный в контуре ток становится достаточным, чтобы скомпенсировать возбуждающее магнитное поле, полная энергия, диссипированная в контуре, и, следовательно, сила сопротивления должны уменьшаться с увеличением скорости. Более точно, числитель выражения (I. II) стремится к константе для больших скоростей и $F_d \sim 1/V$. При еще более высоких скоростях, когда магнитное поле выталкивается из толщи проводника контура и индуцированный ток течет только по поверхности проводника (на глубине скин-слоя), возрастает сопротивление контура и $I_g^2 R_g \sim V^{-1/2}$,

$$а \quad F_d \sim 1/v^{1/2} .$$

При низких скоростях, когда магнитный поток распределен в контуре однородно, величина индуцированного тока прямо пропорциональна скорости v , и $\bar{I}_g^2 R_g \sim v^2$, а $F_d \sim v$. Для данного материала и определенного размера контура имеется соответствующее значение скорости, при котором подводимая мощность оказывается в "фазе" с диссипируемой и диссипируется максимальное количество энергии. При такой скорости сила сопротивления максимальна. Основываясь на вышеизложенном, можно построить зависимость $F_d(v)$, показанную на рис. I.10.

I.2.3.3. Полевой подход.

В соответствии с этим подходом сила определяется по закону Ампера как произведение соответствующей составляющей индукции магнитного поля на ток в контуре и длину контура, находящегося в этом поле.

Проведем рассмотрение полевого подхода на базе простой магнитной системы, приведенной на рис. I.6(в). Согласно третьему закону Ньютона, подъемная сила, действующая на кольцо с током, равна по величине и противоположна по направлению силе, действующей на индуцированный в проводнике круговой ток. (В действительности индуцированный в проводнике ток распределен по всему проводнику, но в основном он сконцентрирован в виде кругового тока непосредственно под создающим магнитное поле кольцом, как показано на рис. I.6 в). Поэтому подъемную силу можно приближенно описать следующим выражением

$$F_L \approx B_T \cdot \bar{I}_i \cdot (2\pi a) \quad (I.12.)$$

где B_T тангенциальная составляющая создаваемого кольцом магнитного поля, действующего на индуцированный круговой ток \bar{I}_i ; a - радиус индуцированного кругового тока.

Индукцированный ток \bar{I}_i пропорционален связанному с ним полному магнитному потоку, который, в свою очередь, пропорционален нормальной составляющей приложенного магнитного поля. Вводя самоиндукцию, получаем:

$$L \cdot \bar{I}_i \approx (\pi a^2) \cdot B_N \quad (I.13.)$$

Выражение (I.13) справедливо только в случае $R_g = 0$ или $V = \infty$. Подставляя (I.13) в (I.12) получаем следующее выражение для подъемной силы:

$$F_L = \left(\frac{4\pi\mu_0 a}{L} \right) \cdot \pi a^2 \cdot \frac{B_N \cdot B_T}{2\mu_0} \quad (I.14.)$$

Множитель в первых скобках в правой части (I.14) безразмерный и порядка единицы, второй множитель представляет площадь, ограниченную индуцированным током, последний — магнитное давление. Заметим, что давление пропорционально произведению нормальной и тангенциальной составляющих индукции создаваемого кольцом магнитного поля.

Силу сопротивления можно непосредственно найти из уравнения (I.11), если известна средняя диссипируемая в контуре мощность, которая определяется выражением

$$\bar{I}^2 R = \left(\frac{\pi a^2}{L} \right)^2 \cdot B_N \cdot R \quad (I.15.)$$

Таким образом, сила сопротивления равна:

$$F_d \approx \frac{R}{V} \left(\frac{\pi a^2}{L} \right)^2 \cdot B_N^2 \quad (I.16.)$$

С помощью (I.14) и (I.16) получается следующее выражение для отношения подъемной силы к силе сопротивления:

$$\frac{F_L}{F_d} \approx \frac{2 \cdot L \cdot B_T}{R \cdot a \cdot B_N} \cdot V \quad (I.17.)$$

Выражение (I.17) показывает, что отношение подъемной силы к силе сопротивления можно увеличить при заданном размере и определенном материале контура за счет такой конфигурации магнита, при которой

отношение B_N/B_T мало. Результатом попыток достижения как можно меньшей B_N/B_T явился ряд оригинальных конструкций магнита и контура, которые подробно приведены в следующем разделе.

1.2.3.4. Резюме.

Электродинамический подвес по сравнению с электромагнитным и подвесом на постоянных магнитах имеет два неоспоримых преимущества:

1. Зазор между магнитами и контурами можно сделать, по крайней мере, на порядок выше, чем в двух рассмотренных ранее системах. Это имеет принципиальное значение при высоких скоростях ротора ОТС.

2. Сильное магнитное поле, создаваемое в большом объеме, можно легко использовать не только для подвеса, но и для привода в движение ротора ОТС, что позволяет совместить механизм подвеса и движения.

С электродинамическим подвесом связаны две проблемы: необходимость в дополнительном типе подвеса на малых скоростях и проблема криообеспечения сверхпроводящих магнитов. Устранение первой проблемы может быть осуществлено применением роликов из сверхпрочного нейлона, допускающего нагрузку до 10^3 кг/м^2 . Такой материал уже в настоящее время выпускается промышленностью. Устранение второй проблемы связано с бурным развитием высокотемпературной сверхпроводимости, уже на сегодняшний день имеющей сверхпроводники, работающие при температуре жидкого азота.

1.3. Электродвигатели для привода ротора ОТС.

1.3.1. Основные требования и особенности.

Электродвигатель для привода в движение ротора ОТС следует рассматривать с двух позиций: - как ротативный; - как линейный. В качестве ротативного такой двигатель имеет диаметр ротора $D = 12756320 \text{ м}$ и угловую частоту вращения ротора в конце разгона $\omega = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ об/мин}$. С таких позиций его целесообразно

рассматривать при выборе электромагнитных нагрузок и основных размеров. В качестве линейного этот двигатель представляет собой индуктор с поперечным размером $50 \div 500$ мм, движущийся относительно оболочки со скоростью 10^4 м/с. С таких позиций его целесообразно рассматривать, когда речь идет о магнитном подвесе. При этом краевые эффекты в такого рода линейном двигателе отсутствуют.

Двигатель для привода ротора ОТС на заданном уровне потребляемой мощности должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать надлежащую величину пускового усилия и требуемые усилия для достижения необходимой скорости движения ротора;
- обеспечивать многофункциональность элементов двигателя (позволять использовать обмотки и магнитопровод не только для привода в движение ротора, но и для его бесконтактного подвеса относительно оболочки ОТС);
- исключить необходимость передачи электрической энергии гальваническим путем на ротор.

Основная особенность электродвигателя для ОТС состоит в следующем. В связи с необходимостью его питания от множества электростанций, включенных параллельно, частота которых составляет 50 Гц, полюсное деление должно составлять величину порядка 100 м. При заданных поперечных размерах ОТС ($50 \div 500$ мм) длина лобовой части обмотки статора в сотни раз будет превосходить длину его активной части. Это приведет к тому, что электрические потери в обмотке двигателя будут весьма существенны и к.п.д. такой машины составит величину не более $0,2 \div 0,25$.

Рассмотрим, в какой мере удовлетворяют изложенным выше требованиям асинхронный двигатель, синхронный и коммутаторный двигатель постоянного тока.

1.3.2. Асинхронный двигатель.

Схема асинхронного двигателя для привода в движение ротора ОТС изображена на рис. 1.11. Статор, включающий сердечник I с многофазной обмоткой 2 закрепляется на оболочке. На роторе устанавливается вторичная обмотка 3, которая выполнена либо в виде шины из металла с высокой электрической проводимостью, либо в виде замкнутых по торцам проводников.

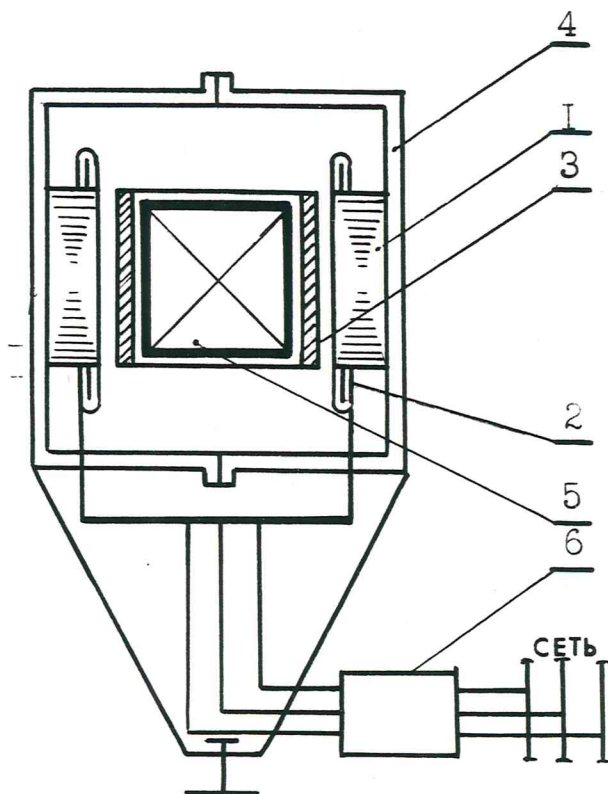
При протекании по обмотке статора синусоидальных токов, сдвинутых по фазе на $2\pi/m$ (m - число фаз), образуется МДС, перемещающаяся вдоль статора и создающая магнитный поток, движущийся вдоль поверхности сердечника. Линейная скорость перемещения волны м.д.с.

$$V_c = \frac{2\tau}{T} = 2\tau \cdot f,$$

где T - период тока, τ - полюсное деление обмотки статора, f - частота питающего напряжения. Магнитный поток, создаваемый м.д.с., будет перемещаться вдоль статора с этой же скоростью V_c (синхронная скорость).

Линии бегущего магнитного поля, пересекая проводники вторичной обмотки, будут наводить в них э.д.с. E_2 . Под действием этих э.д.с. в проводниках будут возникать токи I_2 , которые при взаимодействии с магнитным потоком будут создавать силу F , стремящуюся сместить ротор в направлении перемещения магнитного поля. Сила, действующая на обмотку ротора, может создаваться лишь в том случае, если скорость ее перемещения V меньше скорости V_c . При равенстве этих скоростей магнитный поток не будет пересекать проводники обмотки ротора и в них не будет возникать э.д.с. и ток, создающий при взаимодействии с магнитным потоком движущую силу. Таким образом, ротор должен несколько отставать от магнитного потока, то есть двигаться с некоторым скольжением относительно него. Величина скольжения обычно выражается в относительных единицах и может быть определена

Асинхронный электродвигатель



1 - сердечник; 2 - обмотка статора; 3 - обмотка ротора;
4 - оболочка; 5 - ротор; 6 - преобразователь частоты

Рис. 1.11

Механическая характеристика асинхронного электродвигателя

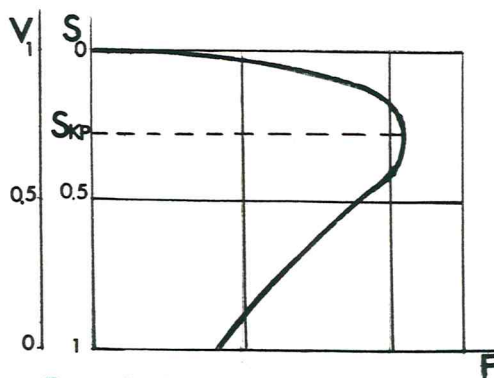


Рис. 1.12

для двигательного режима из соотношения

$$s = \frac{V_c - V}{V_c}$$

Очевидно, чем больше скольжение, тем с большей скоростью магнитный поток пересекает проводники ротора, и тем больше будет Э.Д.С. и ток во вторичной обмотке. Силу, создаваемую двигателем, определяют из выражения:

$$F = c \cdot p \cdot I_2 \cdot \Phi_1 \cdot \cos \psi_2,$$

где c - постоянная, зависящая от геометрии двигателя, p - число пар полюсов двигателя, I_2 - ток в обмотке ротора, Φ_1 - магнитный поток пары полюсов индуктора, сцепляющийся с обмоткой ротора, ψ_2 - фазовый угол сдвига между Э.Д.С. обмотки ротора E_2 и током I_2 в этой обмотке.

Если предположить, что для данного двигателя p и Φ_1 постоянные (что близко к истине, если обмотка индуктора питается от сети переменного тока с неизменными частотой и напряжением) и при этом пренебречь собственными сопротивлениями обмотки, то сила, создаваемая двигателем, определяется током I_2 и $\cos \psi_2$. В связи с тем, что ток растет одновременно с увеличением скольжения, сила тяги при **малых скольжениях** будет возрастать с ростом тока до тех пор, пока активное сопротивление обмотки вторичной части меньше ее реактивного сопротивления. Затем при дальнейшем увеличении скольжения сила тяги может уменьшаться за счет увеличения угла фазового сдвига ψ_2 , который достигает достаточно больших значений при больших скольжениях. Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет вид, показанный на рис. I.12.

Что касается возможности обеспечения асинхронным двигателем заданного уровня потребляемой мощности, то здесь имеются следующие соображения.

Известно, что потребляемая и развиваемая мощности асинхронного двигателя соотносятся следующим образом.

$$P_{\text{порт.}} = \frac{P_{\text{разг.}}}{\eta \cdot \cos\varphi},$$

где η - коэффициент полезного действия, $\cos\varphi$ - коэффициент мощности. Как изложено выше, η для двигателя ОТС не превышает величины $0,2 \div 0,25$. А $\cos\varphi$ в асинхронных двигателях со сравнительно большим воздушным зазором ($10 \div 15$ мм) не превышает значения $0,3$ [2]. Очевидно, что при самых низких значениях удельной массы ротора, потребляемая мощность значительно превысит заданный предел. Радикальный путь для снижения значения намагничивающего тока, а следовательно увеличения $\cos\varphi$ - уменьшение зазора, что неприемлемо относительно пуска и достижения требуемой скорости движения ротора ОТС.

Мощность асинхронного двигателя ОТС чрезвычайно велика и пусковой ток при прямом пуске вызовет недопустимо большое падение напряжения в сети. Кроме того, при пуске в обмотке ротора выделяется тепловая энергия, равная кинетической энергии приводимых в движение масс. Выделение энергии в первичной цепи обычно несколько больше, чем во вторичной. То есть имеется возможность перегрева двигателя. Поэтому прямой пуск невозможен и надо применять пуск при пониженном напряжении. Достижение требуемой скорости может обеспечить лишь регулирование частоты питающего напряжения. Синхронизация для этой цели ряда параллельно работающих преобразователей частоты весьма проблематична.

Относительно многофункциональности. Двигатель ОТС можно представить как сочетание двух односторонних линейных асинхронных двигателей (ОЛАД). Несимметричность магнитной системы ОЛАД приводит к появлению нормальных усилий (перпендикулярных к поверхности индуктора). Однако использование этих усилий в практических целях для магнитного подвеса ротора ОТС весьма проблематично, так

как в области больших скольжений эти усилия проявляются как усилия отталкивания, а в области малых ($s < s_{кр.}$) — как усилия притяжения.

Единственное требование, которому безоговорочно удовлетворяет асинхронная машина в качестве двигателя ОТС, это отсутствие передачи электрической энергии гальваническим путем на ротор. Однако другие требования в асинхронных двигателях существующих конструкций весьма далеки от того, чтобы его можно было использовать в качестве двигателя ОТС.

1.3.3. Синхронный двигатель.

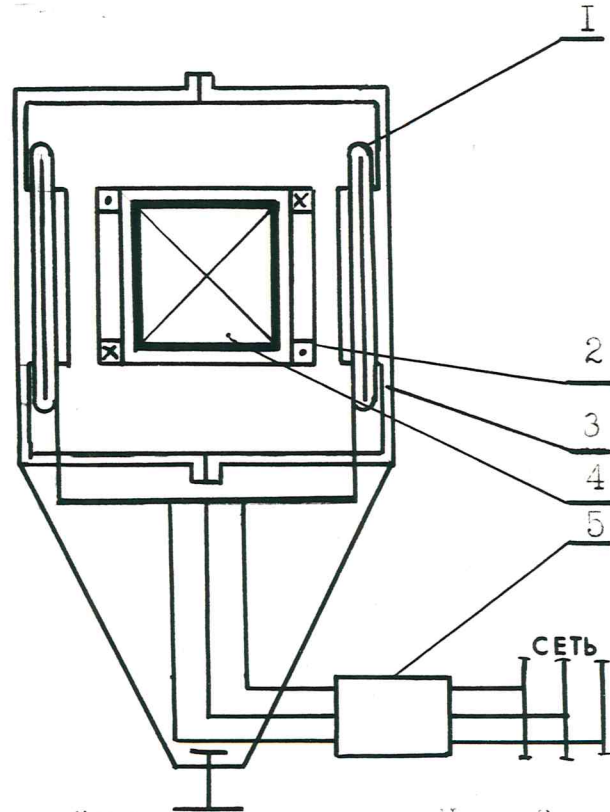
Схема синхронного двигателя для привода в движение ротора ОТС изображена на рис. 1.13. Многофазная обмотка якоря 1 закрепляется на оболочке, а обмотка возбуждения индуктора 2 — на роторе ОТС. Причем, обмотка возбуждения индуктора — сверхпроводящая, работающая в режиме замороженного потока. Так что необходимости в передаче электрической энергии на ротор после запитки обмотки возбуждения и ее закорачивания нет.

Как и в асинхронном двигателе при протекании по обмотке якоря многофазных синусоидальных токов, сдвинутых по фазе на $2\pi/m$, образуется перемещающаяся вдоль статора м.д.с. с числом полюсов, определенным протеканием тока по поверхности статора. Возбужденный индуктор в силу стремления физической системы к минимуму энергии будет стремиться устанавливаться по направлению потока статора. А следовательно, двигаться в направлении перемещения магнитного поля якоря с синхронной скоростью $v_c = 2\tau \cdot f$. На рис. 1.14 поля индуктора и якоря изображены для ясности в виде двух систем полюсов, движущихся с одинаковой скоростью слева направо.

Сила тяги синхронного двигателя определится в соответствии с выражением:

$$F = m \frac{e \cdot U}{X \cdot v} \sin \theta,$$

Синхронный электродвигатель. Устройство



1 - обмотка якоря; 2 - сверхпроводящая обмотка возбуждения;
3 - оболочка; 4 - ротор; 5 - преобразователь частоты

Рис. 1.13

Синхронный электродвигатель. Принцип действия

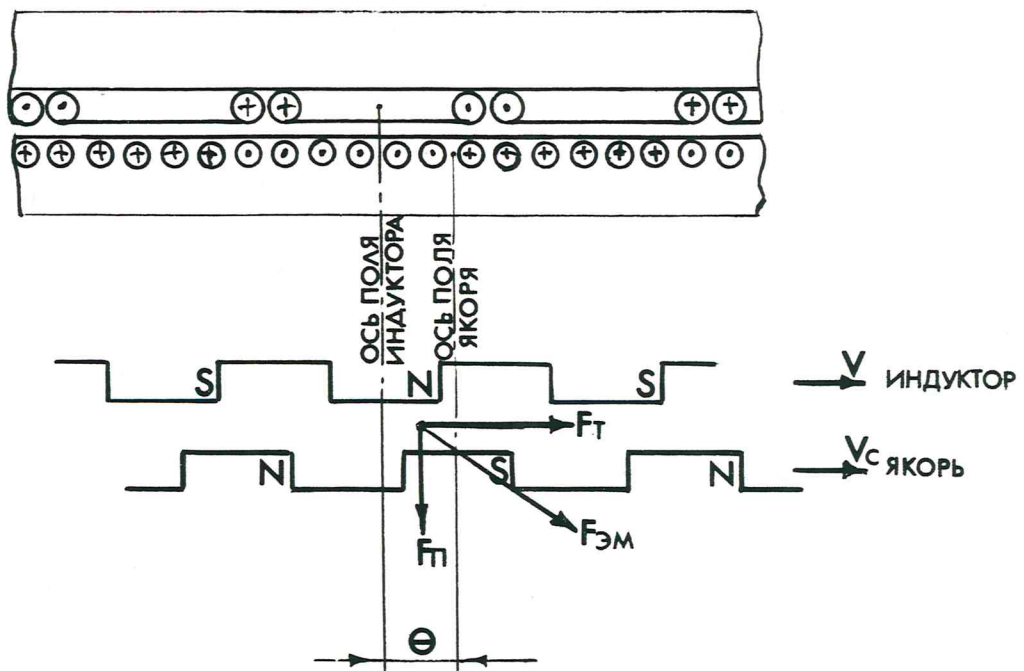


Рис. 1.14

где m - число фаз обмотки якоря, e - э.д.с. в обмотке якоря, создаваемое потоком сверхпроводящей обмотки индуктора, U - напряжение на зажимах обмотки якоря, X - индуктивное сопротивление, θ - угол нагрузки (временное его толкование понятно из векторной диаграммы (рис. I.15), а пространственное из рис. I.14.).

Как видно из рис. I.14, сила тяги в синхронном двигателе возникает лишь тогда, когда $\theta > 0$. Эта сила максимальна при $\theta = 90^\circ$. Однако, как показала практика, устойчивая работа синхронного двигателя имеет место лишь в том случае, когда угол нагрузки θ не превышает 30° . Если учесть, что коэффициент мощности этого двигателя достигает значений $0,92 \div 0,97$, то очевидно, что по сравнению с потребляемой мощностью доля развиваемой мощности ощутимо больше и находится уже на реализуемом уровне.

Что касается пуско-регулирующих свойств синхронного двигателя, то по этому параметру он уступает асинхронному двигателю. Дело в том, что наиболее распространенный асинхронный способ пуска такого двигателя требует до достижения определенной скорости движения ротора обмотку индуктора держать невозбужденной и, более того, замкнутой на определенное сопротивление. Возбудить же ее на скорости близкой к синхронной ($v_c = 10 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) весьма и весьма проблематично. Поэтому остается лишь частотный способ пуска, при котором частота подводимого к обмотке якоря напряжения плавно изменяется от нуля до номинального значения. На сегодняшний день проблема регулирования особенно низких частот в преобразователях частоты не решена. А если сюда еще добавить необходимость синхронизации большого количества таких преобразователей в системе питания ОТС - получим чувство безысходности в наиболее полном ощущении.

Поскольку применение сверхпроводящей обмотки возбуждения индуктора позволяет отказаться от ферромагнитного сердечника на якоре, то расположенные на оболочке ОТС обмотки и проводящие элемен-

Векторная диаграмма синхронного двигателя

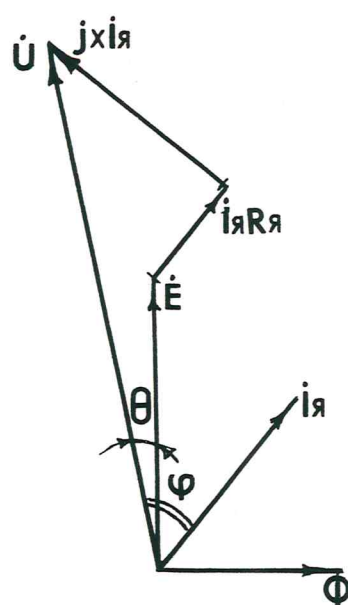
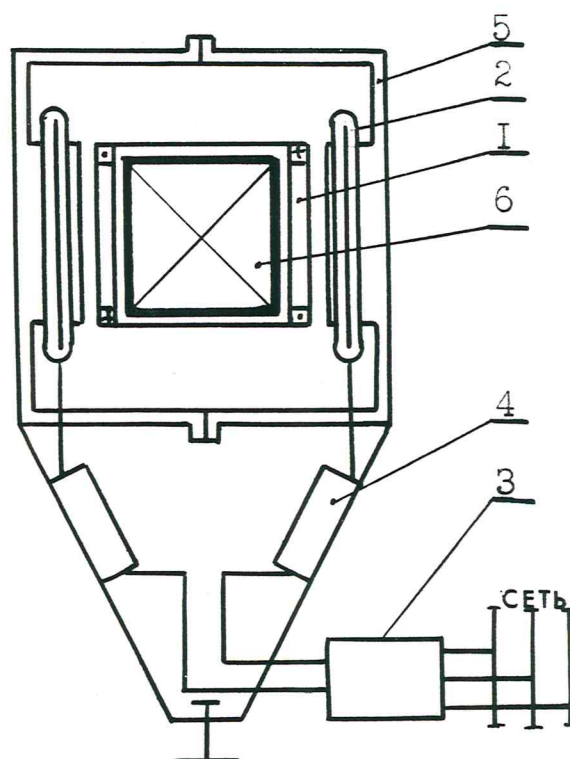


Рис. 1.15

Устройство коммутаторного электродвигателя



- 1 - сверхпроводящая обмотка возбуждения; 2 - обмотка якоря;
3 - выпрямитель; 4 - коммутатор; 5 - оболочка; 6 - ротор

Рис. 1.16

ты можно комбинировать таким образом, чтобы они помимо тяги обеспечивали и функции систем электродинамического подвеса.

Таким образом, существенным препятствием на пути использования синхронного двигателя для привода ротора ОТС является лишь проблема пуска в ход и регулирования частоты вращения ротора.

1.3.4. Коммутаторный двигатель постоянного тока.

Схема коммутаторного двигателя постоянного тока приведена на рис. 1.16. Как и в синхронном двигателе сверхпроводящая обмотка индуктора 1, работающего в режиме "замороженного потока", фиксируется на роторе, а обмотка якоря 2 закреплена на оболочке ОТС. Секции обмотки якоря питаются от сети переменного тока, работающей на выпрямителе 3, через тиристорный коммутатор 4. Процесс работы двигателя постоянного тока более наглядно может быть представлен на примере двигателя с коллекторным коммутатором, приведенного на рис. 1.17. Если на секции обмотки якоря при возбужденном индукторе через щетки и коллекторные пластины подать напряжение, то возникает электромагнитная сила тяги

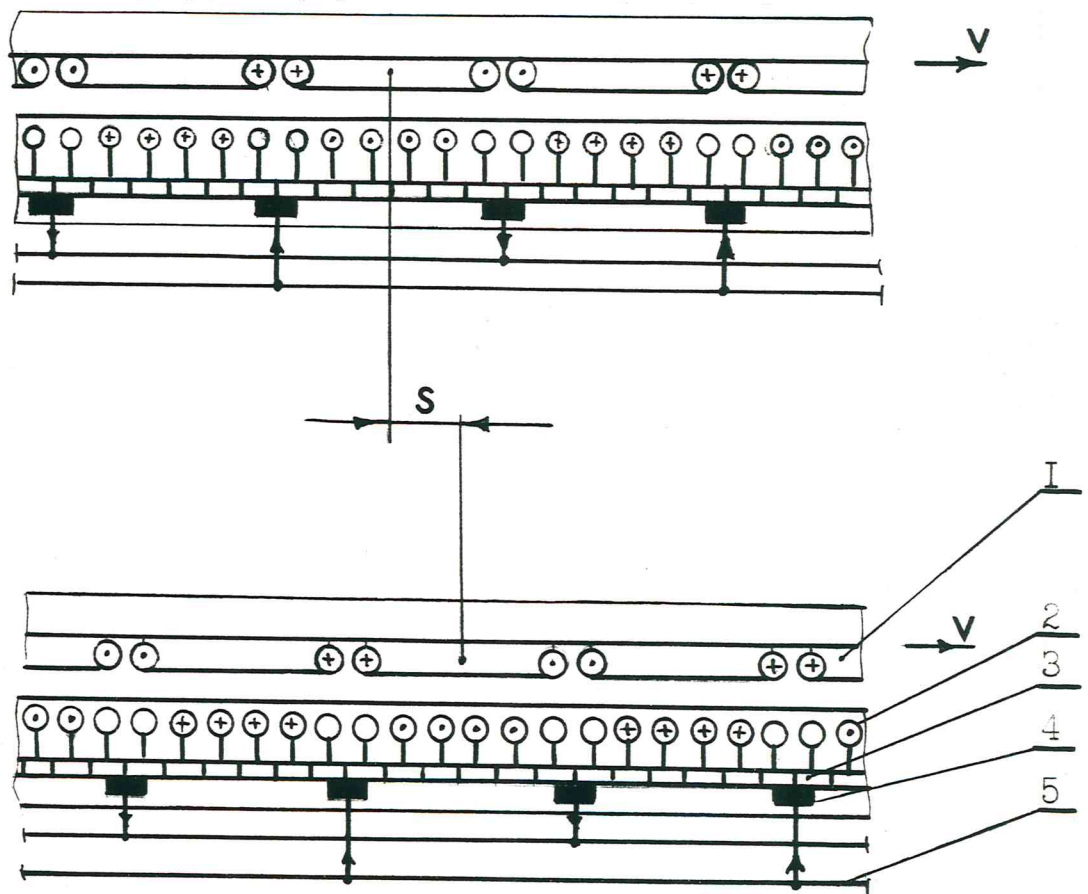
$$F = C_m \cdot \Phi_c \cdot I_a$$

где C_m - коэффициент, характеризующий геометрические параметры, Φ_c - магнитный поток в активной зоне машины, I_a - ток якоря. Под действием этой силы ротор придет в движение и жестко связанные с ним щетки будут переключать секции обмотки якоря из состава одной параллельной ветви в состав другой, изменяя тем самым в них ток на противоположный и поддерживая направление силы тяги неизменным. Напряжение, подаваемое на обмотку якоря, будет уравниваться падением напряжения в сопротивлении якорной обмотки и противо-э.д.с. наводимой в ней магнитным полем сверхпроводящей обмотки возбуждения индуктора

$$U = e + I_a R_a = C_e \cdot \Phi_c \cdot \omega + I_a R_a$$

Из этого выражения получим

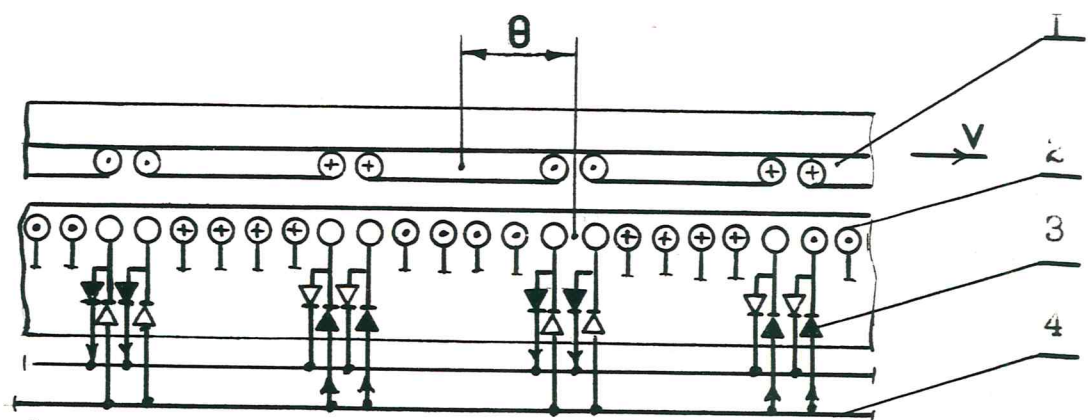
Работа коллекторного двигателя постоянного тока



1 - обмотка возбуждения; 2 - обмотка якоря; 3 - коллектор;
5 - фидер; $S = v \cdot T_k$ (T_k - время коммутации одной секции)

Рис. 1.17

Двигатель постоянного тока с тиристорным коммутатором



1 - обмотка возбуждения; 2 - обмотка якоря; 3 - тиристорный коммутатор; 4 - фидер

Рис. 1.18

$$V = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{c_E \Phi_0},$$

что при постоянстве магнитного потока Φ_0 пуск в ход ротора ОТС, а также регулирование его скорости движения, может легко и плавно осуществляться изменением подаваемого на обмотку якоря напряжения. Однако применение механического коммутатора-коллектора ограничено скоростью 100 ÷ 140 м/с. Поэтому реализовать принцип действия двигателя постоянного тока в ОТС можно лишь в том случае, если переключение секций обмотки якоря осуществлять с помощью тиристорного коммутатора. Схема такого двигателя приведена на рис. I.18. Запирание и отпирание тиристорov производится сигналами от специальных датчиков в зависимости от расположения полюсов индуктора.

Доля развиваемой мощности в потребляемой для двигателя постоянного тока выше, чем в синхронном. Если сопоставить рис. I.18 и I.14 то становится очевидным, что двигатель постоянного тока с точки зрения развиваемой силы тяги аналогичен синхронному двигателю, работающему при угле нагрузки $\Theta = 90^\circ$.

Показатель многофункциональности в коммутаторном двигателе постоянного тока на уровне синхронного двигателя.

Таким образом, из трех имеющихся типов электродвигателей для привода в движение ротора ОТС наиболее предпочтителен коммутаторный двигатель постоянного тока со сверхпроводящей обмоткой возбуждения индуктора.

I.4. Основной вывод.

В результате рассмотрения трех систем магнитного подвеса ротора ОТС (с помощью постоянных магнитов, электромагнитной на принципе притяжения и электродинамической на принципе отталкивания), а также трех типов электродвигателей (асинхронного, синхронного и коммутаторного постоянного тока) для привода в движение ротора ОТС, установлено, что для подвеса наиболее пригодна электродинамическая

система, а в качестве устройства привода в движение ротора ОТС - двигатель постоянного тока с тиристорным коммутатором. Причем, эффективная работа систем подвеса и движения будет иметь место в случае, если в качестве источника постоянного магнитного поля будут использованы сверхпроводящие обмотки возбуждения.

2. СИСТЕМЫ ТЯГИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Прежде чем приступить к анализу различных схемных решений сверхпроводниковой тяговолеватационной системы (ТЛС) с точки зрения их пригодности для создания тяги и подвеса ротора ОТС, необходимо оговорить, с каких именно позиций - технических, технологических или стоимостных - предлагается оценивать их преимущества и недостатки.

Не вызывает сомнений, что наиболее объективным и интегральным по своей сущности критерием оптимальности ТЛС является минимум затрат на ее строительство и эксплуатацию при условии удовлетворения ею всех технических требований. Однако, рассмотреть этот вопрос в рамках настоящей работы не представляется возможным из-за целого ряда причин, важнейшей среди которых является отсутствие как такового в мировой практике опыта проектирования и создания систем аналогичного класса. Достаточно отметить, что в результате 20-летней напряженной конкурентной борьбы между ФРГ и Японией по вопросу создания высокоскоростного наземного пассажирского транспорта на магнитной ^{подушке} (несомненно, более простая задача), единого мнения в отношении превосходства одной программы над другой (Maglev и Transrapid) так и не сложилось.

Вторым обстоятельством, с одной стороны, осложняющим стоимостной анализ ТЛС, и с другой стороны, расширяющим возможности ее технического совершенствования, является бурный прогресс в технологии сверхпроводящих материалов. Если до сегодняшнего дня основным материалом обмоточных проводов сверхпроводящих катушек служил Nb-Ti с критической температурой 8 - 10 К, то сегодня уже созданы сверхпроводящие материалы с критической температурой выше температуры кипения жидкого азота (77 К). Что будет завтра, и главное - какова будет стоимость сверхпроводников, работающих при комнатной температуре, сегодня ответить очень трудно, однако, по мнению специалистов, такие

сверхпроводники будут созданы к 2000 г.

Таким образом, целью настоящего раздела являются обзор известных схем электродинамического подвеса, систематизация предложений по совершенствованию конфигураций вторичного элемента и анализ технических проблем создания сверхпроводниковой ТЛС ротора ОТС, в результате которого должны быть:

- указаны ее ближайшие конструктивные аналоги, способные в первом приближении выполнять функции тяги и подвеса ротора с учетом его топологических особенностей;

- выявлен перечень характерных признаков "идеальной" системы электродинамического подвеса, способной работать с минимальными потерями в заданном диапазоне скоростей (имеется в виду, во-первых, место расположения СПОВ - на статоре или роторе устройства, во-вторых, тип вторичного элемента - непрерывный или дискретный, наконец, в третьих, тип системы подвески - нормальнопоточный, нульпоточный или дифференциальный).

Чтобы найти правильное решение поставленной задачи, необходимо составить себе ясное и полное представление о том, какие практические достижения экспериментальной техники характеризуют современный уровень развития ЛЭМПЭ со СПОВ, в чем состоят трудности их создания и каковы перспективы их использования при более высоких скоростях.

2.1. Классификация линейных двигателей со сверхпроводящим индуктором и устройств электродинамической подвески

В конце 60-х годов разработчикам высокоскоростного наземного транспорта стало ясно, что скорость движения рельсовых транспортных средств ограничена особенностями сцепления колеса с рельсом при высоких скоростях и не может превысить некоторый предел, который по различным оценкам составляет 350-500 км/час. Именно с пониманием этого обстоятельства связан осуществлявшийся во всем мире поиск систем опирания, тяги и энергоснабжения транспортного средства, главной чертой которых было бы отсутствие механического контакта между экипажем и путевым полотном. Пришедшие на смену поездам на воздушной подушке с реактивной тягой устройства бесконтактной электродинамической подвески и линейные синхронные двигатели со СПОВ стали той новой "элементной базой", на которой стало возможным осуществление ЛЭМПЭ, решающего указанные проблемы.

Процесс внедрения СПОВ в сравнительно хорошо развитую и изученную область линейных двигателей шел первоначально по пути тривиальной замены обмоток возбуждения нормальной проводимости сверхпроводящими. При этом, как и следовало ожидать, наиболее существенным изменениям подверглась магнитная цепь машины, в то время как электрическая в течение продолжительного периода времени сохраняла традиционную форму. По этой причине система классификационных признаков, разработанная для ЛЭД обычного исполнения, применима и для ЛЭД со СПОВ, особенно в той части, где речь идет о конструкции якорных обмоток и топологических особенностях машины в целом.

На рис. 2.1. приведена диаграмма, содержащая описание каждого известного типа ЛД со СПОВ. Для полного топологического описания конкретной машины достаточно двигаться по диаграмме снизу вверх, выбирая нужное направление в точках ветвления.

Диаграмма классификационных признаков
ЛД со СПОВ

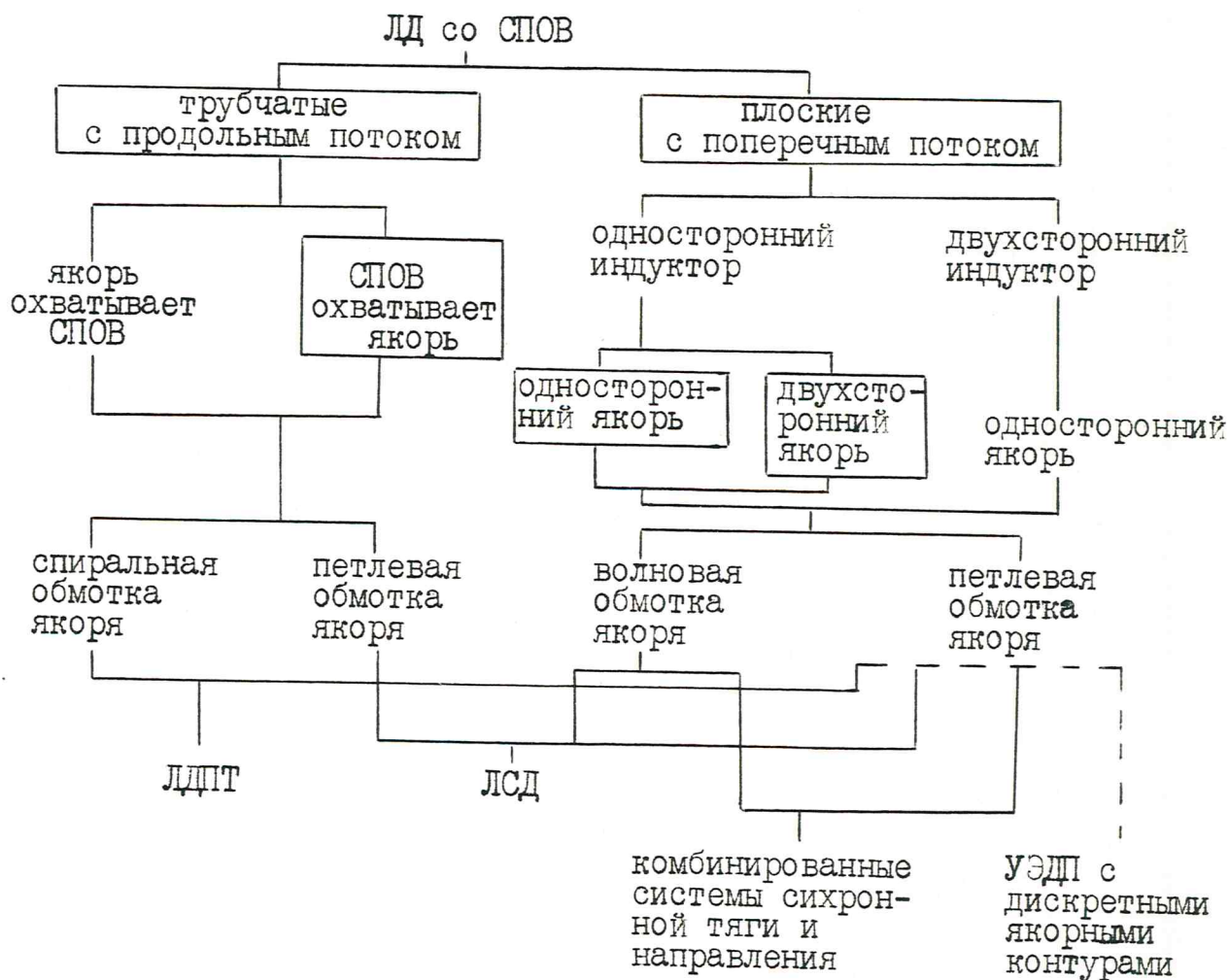


Рис. 2.1.

Начальный этап развития транспорта на электродинамическом подвесе связан с представлениями об ЛЭМПЭ как комплексе автономных устройств, самостоятельно обеспечивающих привод, подвеску, направление и демпфирование колебаний подвижной части, и характеризуется повышенным вниманием к исследованию и разработке однофункциональных устройств. Поскольку в состав каждого такого устройства входили свои СПОВ и вторичный элемент, то на подвижной части ЛЭМПЭ предполагалось размещать несколько индукторов из единообразно расположенных СПОВ, а на путевом полотне - соответствующее количество типов вторичных элементов. С учетом возможности комбинированного использования вторичной части для создания тяги экипажа количество компоновочных схем ЛЭМПЭ приближается, по данным [3] к 40. Следует, однако, учитывать, что эта цифра получается в результате сочетаний в одной структуре значительно меньшего количества элементарных устройств подвески, выполняющих во всех случаях использования идентичные функции.

Основным признаком, в соответствии с которым все многообразие УЭДП распадается на две большие, конкурирующие между собой группы, служит тип вторичного элемента (дискретный или непрерывный). Основным преимуществом УЭДП со вторичным элементом в виде непрерывного (листового) полотна [4], определявшим на протяжении ряда лет их высокую популярность среди разработчиков ВСНТ во всем мире, является возможность обеспечения подвески экипажа при помощи сравнительно небольшого количества СПОВ малой единичной мощности. Для сравнения необходимо отметить, что одна и та же СПОВ создает в устройстве с дискретными якорными катушками приблизительно в 3 раза меньшее подъемное усилие, чем в устройстве с листовым полотном. Поэтому при магнитодвижущей силе СПОВ 300 к А - типичном значении, на которое ориентировались в первые годы при выполнении силовых

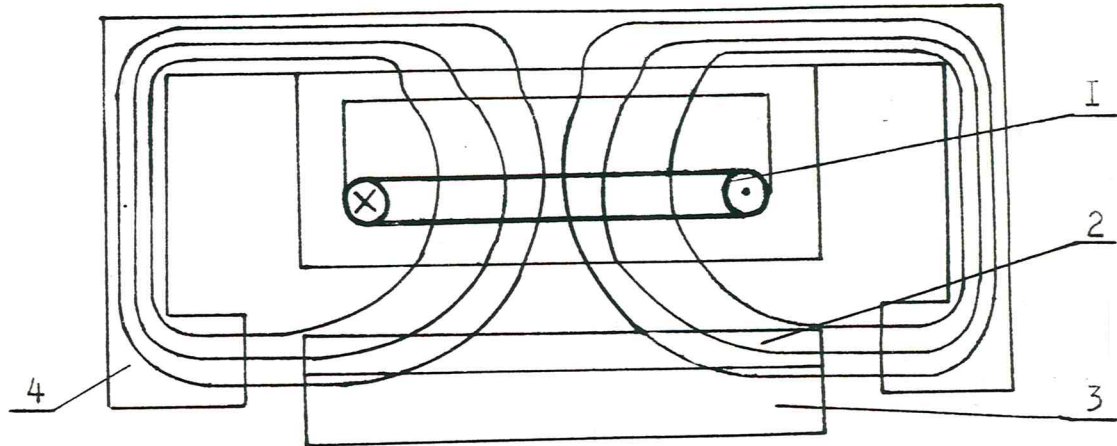
расчетов и разработке проектов транспортных систем - удовлетворительная масса магнитной системы, требуемой для подвески экипажа, могла быть получена только при выборе за основу УЭДП с непрерывной вторичной частью.

Существенным функциональным недостатком УЭДП с листовым полотном являются большие потери во вторичном элементе, обуславливающие возникновение значительного тормозного усилия. Для преодоления этого недостатка был разработан ряд конструктивных мер, сводящихся, с одной стороны, к снижению вихревых токов во вторичном элементе за счет уменьшения нормальной составляющей индукции магнитного поля СПОВ в центральной части полосы и, с другой стороны, к увеличению тангенциальной составляющей индукции в торцевых областях полосы, плотность вихревого тока в которых максимальна, Как видно на рис.2.2., такой эффект достигается либо изгибанием вторичного элемента вдоль силовых линий потока, либо, наоборот, деформацией силовых линий за счет размещения дополнительных СПОВ или ферромагнитных магнитопроводов на экипаже.

Наибольшее количество предложений по улучшению конструкций устройств ЭДП непрерывного типа касается разработки таких профилей вторичного элемента, при взаимодействии с которыми в устройстве возникало бы не только подъемное, но и направляющее усилие. Примеры таких устройств представлены на рис.2.3. В практическом отношении наибольший интерес представляют здесь устройства с квадрупольными СПОВ, поскольку в них возникают наименьшие потери от вихревых токов. Однако в связи с трудностями обеспечения требуемой механической прочности направляющей, например, крестообразного сечения, эти устройства вряд ли будут реализованы когда-либо.

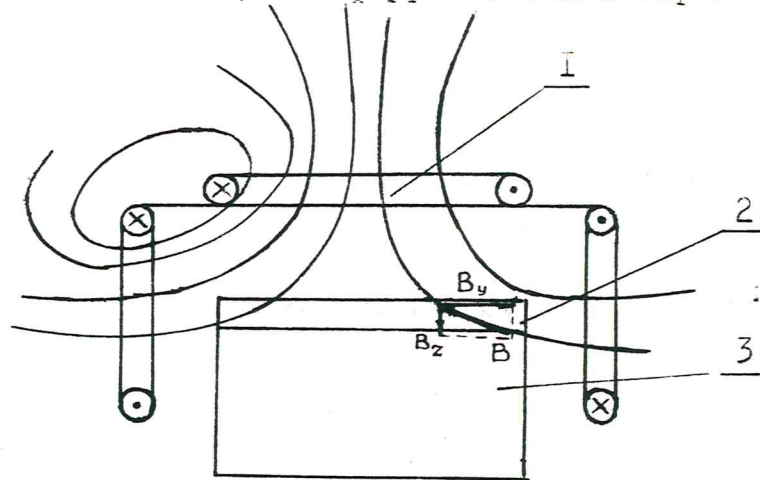
По мнению автора [5], УЭДП с листовым полотном безусловно уступают по своим характеристикам устройствам дискретного типа. Очевидно, что недостатки листовой вторичной части не могут быть

Пути совершенствования УЭДП с листовым
вторичным элементом

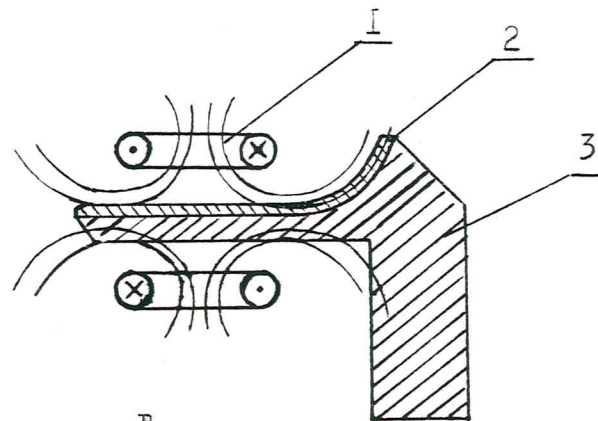


а

1 - экипажные СПОВ; 2 - листовый вторичный элемент;
3 - путевое полотно; 4 - ферромагнитный экран



б

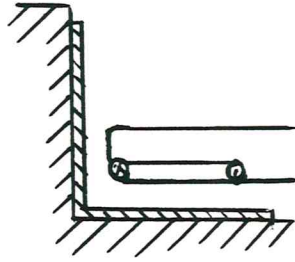


в

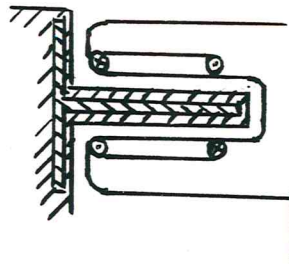
а - с применением ферромагнитного экрана;
б - размещение дополнительных СПОВ;
в - изгибание вторичного элемента вдоль силовых линий

Рис. 2.2

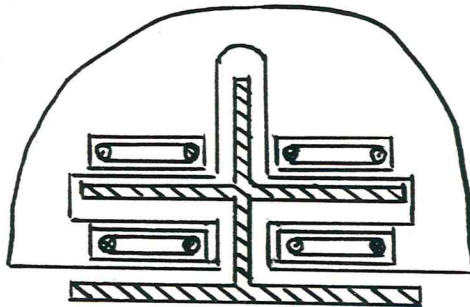
Профили листового вторичного элемента УЭДПН



а



б



в

а - с дипольными СПОВ; б, в - с квадрупольными СПОВ

Рис. 2.3

устранены конструктивными мерами, поскольку основу этих недостатков составляют особенности электрофизических процессов наведения тока, внутренне присущие любой системе с протяженным массивным проводником. Одна из этих особенностей - скин эффект, проявляющийся при высоких скоростях движения транспортного средства. Вытеснение наведенных токов в поверхностный слой вторичного элемента служит основной причиной того, что с ростом скорости тормозное усилие в устройстве непрерывного типа уменьшается слишком медленно по сравнению с ходом аналогичной кривой для устройства с дискретными путевыми контурами.

Использованию УЭДП с листовым полотном препятствуют и трудности чисто технологического характера. Например, проблема механической стыковки и электрического соединения между собой отдельных секций полотна, которая обыкновенно не принимается во внимание, но реально существует, особенно для стран с большим интервалом колебаний среднемесячных температур [6] .

Устройства подвески с дискретными путевыми контурами выгодно отличаются от УЭДП листового типа прежде всего более высокой эффективностью преобразования тягового усилия двигателя в усилие подвески экипажа. При наборе скорости экипажем подъемное усилие будет возрастать быстрее в УЭДП с контурами, чем с листовой вторичной частью, кроме того, пик силы торможения будет пройден в диапазоне меньших скоростей.

УЭДП с дискретными якорными контурами можно классифицировать, подобно ЛД, по конструктивным особенностям индуктора и якоря в отдельности. Действительно, среди них есть устройства с односторонним и двухсторонним индуктором, так же как с односторонним и двухсторонним якорем. Однако такая классификация характеризует лишь внешнюю форму, топологию УЭДП, но не затрагивает сущности происходящих в нем явлений и процессов, хотя последние отличаются большей сложностью по сравнению с ЛД. С этой точки зрения более удачной

представляется классификация УЭДП по типу потока взаимной индукции, пронизывающего СПОВ и якорные контура. В соответствии с этим признаком различают устройства нормального и нулевого потока [7], [8].

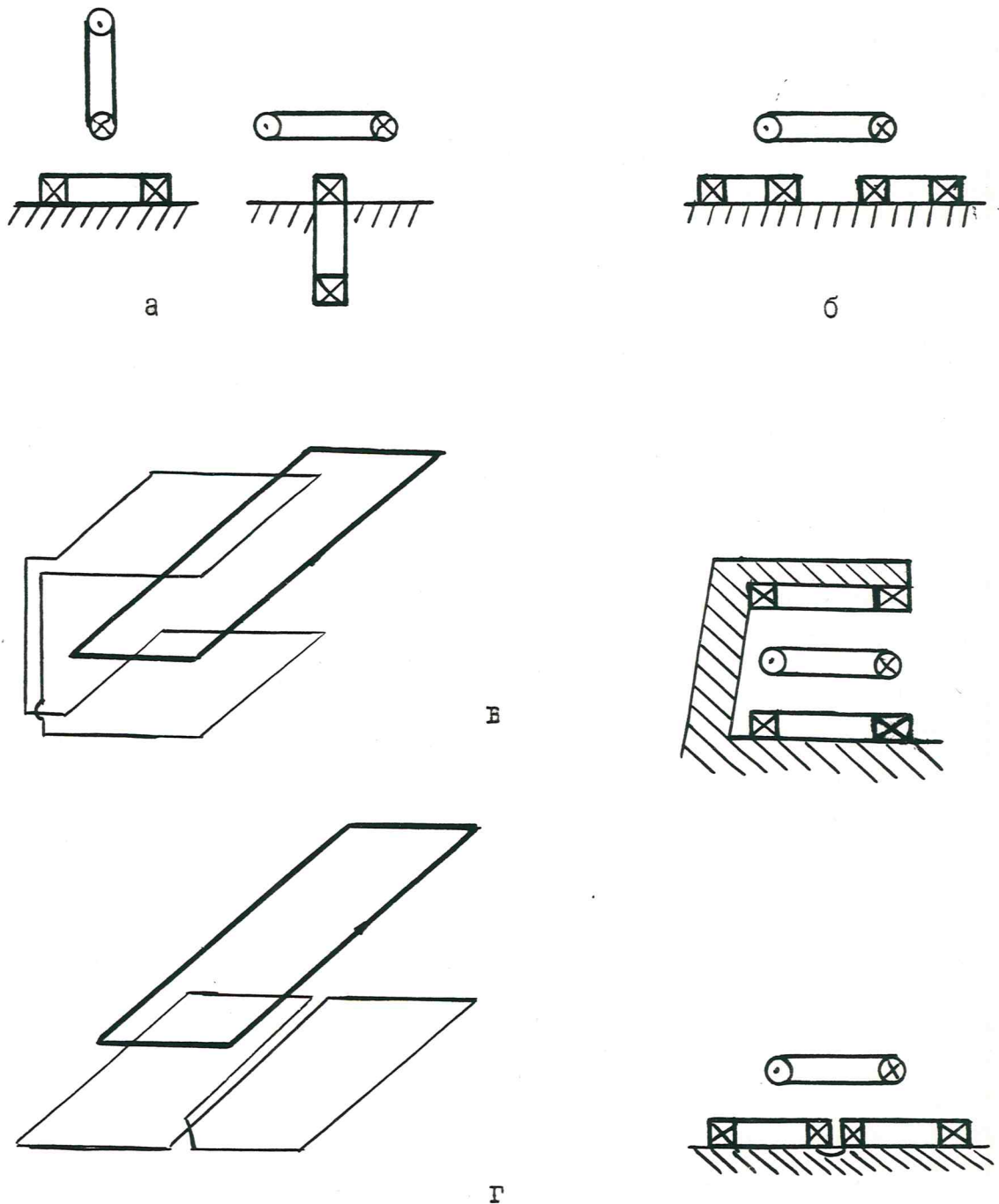
Понятия нормального и нулевого потока впервые появились в работах Пауэлла и Дэнби и использовались ими для обозначения типа магнитной связи между первичным и вторичным элементами УЭДП. В противоположность устройствам нульпоточного типа, для которых характерно реверсирование направления действия рабочего усилия при изменении знака смещения СПОВ относительно рабочего положения, в устройствах нормального потока электродинамическое усилие изменяется при любом смещении СПОВ только по величине.

Известны две конструкции нормальнопоточных устройств, которые отличаются между собой только ориентацией СПОВ относительно вторичной части, представляющей собой в обоих случаях цепочку горизонтально расположенных друг за другом однопетлевых короткозамкнутых контуров. По отношению к ним СПОВ могут располагаться либо в параллельной плоскости - таким образом, чтобы оси продольной симметрии СПОВ и контуров находились одна над другой (см. рис. 1.8), либо под прямым углом - в вертикальной плоскости, проходящей вблизи одной из боковых сторон каждого контура.

Как в первом, так и во втором устройстве рабочее усилие действует вдоль зазора между СПОВ и контурами. При увеличении зазора оно уменьшается, причем тем медленнее, чем больше зазор.

Группа нульпоточных устройств, или устройств с нулевым потоком взаимной индукции, почти целиком представлена в первом патенте по ЭДП [9]. Она содержит два устройства с однопетлевыми и два устройства с двухпетлевыми якорными контурами (рис. 2.4.). В дополнение к ним советскими учеными из Физико-энергетического института АН Латв. ССР предложено еще одно нульпоточное устройство, изображенное на рис. 2.4, б [10].

Группа нульпоточных устройств ЭДПН
транспортного средства



а, б - УЭДП с однопетлевыми якорными контурами;
в, г - УЭДП с двухпетлевыми якорными контурами.

Рис. 2.4

Как уже упоминалось ранее, в работе нульпоточных устройств ЭДП имеется особенность, состоящая в наличии "мертвой" точки на рабочей характеристике, описывающей зависимость силы подвеса (направления) от смещения СПОВ относительно якорных контуров в направлении осей y или z (при условии $v = \frac{dx}{dt} = \text{const.}$). В этой "мертвой" точке магнитная связь между первичным и вторичным элементами устройства отсутствует, вихревые токи в контурах не наводятся и электродинамические усилия не возникают.

Рассмотрим вкратце работу нульпоточного устройства, взаимное положение элементов которого раскрывается на рис.2.4,в. Здесь рабочее усилие действует также вдоль зазора между СПОВ и петлями контура, в то время как у остальных нульпоточных устройств оно направлено поперек зазора.

Итак, при движении СПОВ в плоскости, равноотстоящей от верхней и нижней петель каждого путевого контура, вихревой ток в контуре не наводится. Достигается это благодаря такому электрическому соединению этих петель между собой, когда ЭДС, наведенные в верхней и нижней петлях, направлены встречно и компенсируют друг друга.

При смещении СПОВ ниже срединной плоскости ЭДС, наведенная в нижней петле каждого контура, увеличивается, а ЭДС в верхней петле уменьшается. Под действием разности ЭДС в контуре появляется ток. Направление протекания его по петлям таково, что СПОВ отталкивается от нижнего ряда петель и притягивается к верхним.

При смещении СПОВ выше срединной плоскости в контуре развивается аналогичный переходный процесс, но теперь ЭДС в верхней петле превосходит по амплитуде ЭДС в нижней петле. Следовательно, вихревой ток течет в противоположном направлении, а электродинамическое усилие действует на СПОВ сверху вниз.

Во всех выполненных теоретических и экспериментальных исследованиях признается, что нульпоточные устройства ЭДП несомненно более прогрессивны по сравнению с номальнопоточными, поскольку позволяют создать требуемую силу подвеса при меньших потерях. В

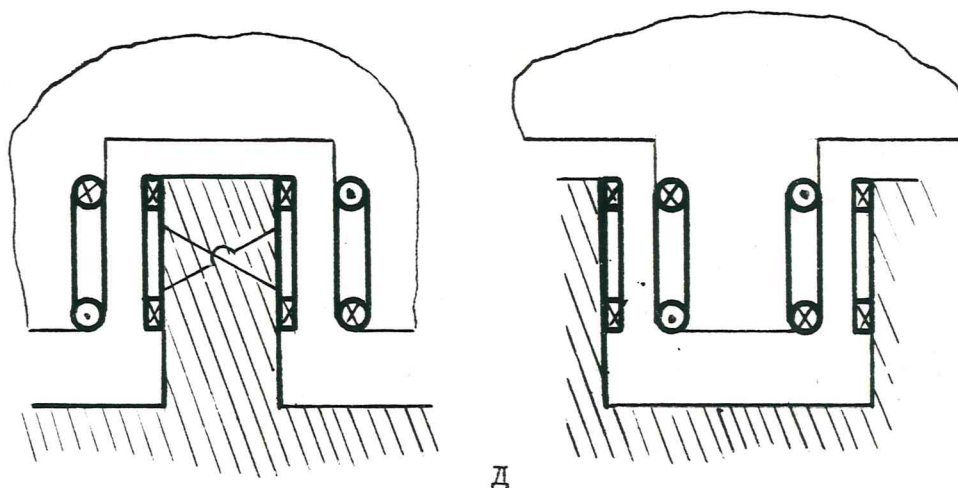
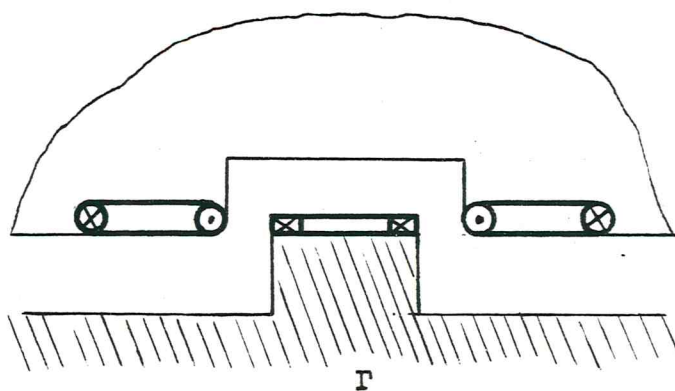
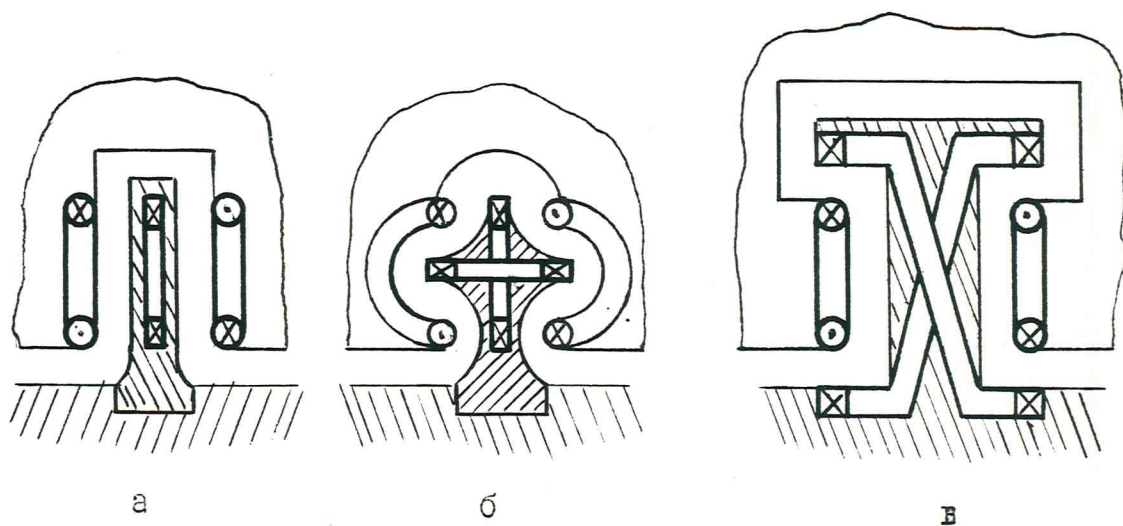
то же время, следует учитывать, что для эффективной работы нульпоточных устройств требуется СПОВ с очень высокой МДС (порядка 1 MA).

В другой работе Пауэлла и Дэнби [II] впервые описана конструкция электродинамического направляющего устройства с квадрупольными СПОВ, охватывающими расположенные между ними якорные контура (рис.2.5,а). Сперва это устройство также получило название нульпоточного, но, по нашему мнению, точнее было бы отнести его к группе дифференциальных устройств, поскольку якорный контур, находящийся между разнополярными СПОВ, пронизывает разностный - дифференциальный - поток.

Для этого устройства свойственны такие недостатки, как большое расталкивающее усилие, действующее между противолежащими СПОВ, а также сложность обеспечения требуемой жесткости направляющей. Однако свойство дискретного вторичного элемента интегрировать магнитный поток, пронизывающий петли контура, позволило создать такие конфигурации дифференциальных устройств, в которых указанные недостатки в значительной мере ослаблены. Например, на рис.2.5 изображены устройства с горизонтальными СПОВ (позиция г) и с расщепленной якорной обмоткой (позиция д), в которых и СПОВ достаточно удалены друг от друга, и путевое полотно может быть выполнено достаточно прочным.

Классификационные признаки, разработанные для устройств с дискретными якорными контурами, можно использовать и для устройств с листовым вторичным элементом. Здесь можно найти практически те же типы магнитной связи, выделить аналогичные группы устройств. Но при попытке использовать идеи и приемы, предложенные для совершенствования конструкции дискретного вторичного элемента, в устройствах с листовым вторичным элементом мы сталкиваемся с непреодолимыми трудностями.

Группа УЭДП дифференциального типа



а, б, г - устройства с однопетлевыми якорными контурами;
в, д - устройства с двухпетлевыми якорными контурами.

Рис. 2.5

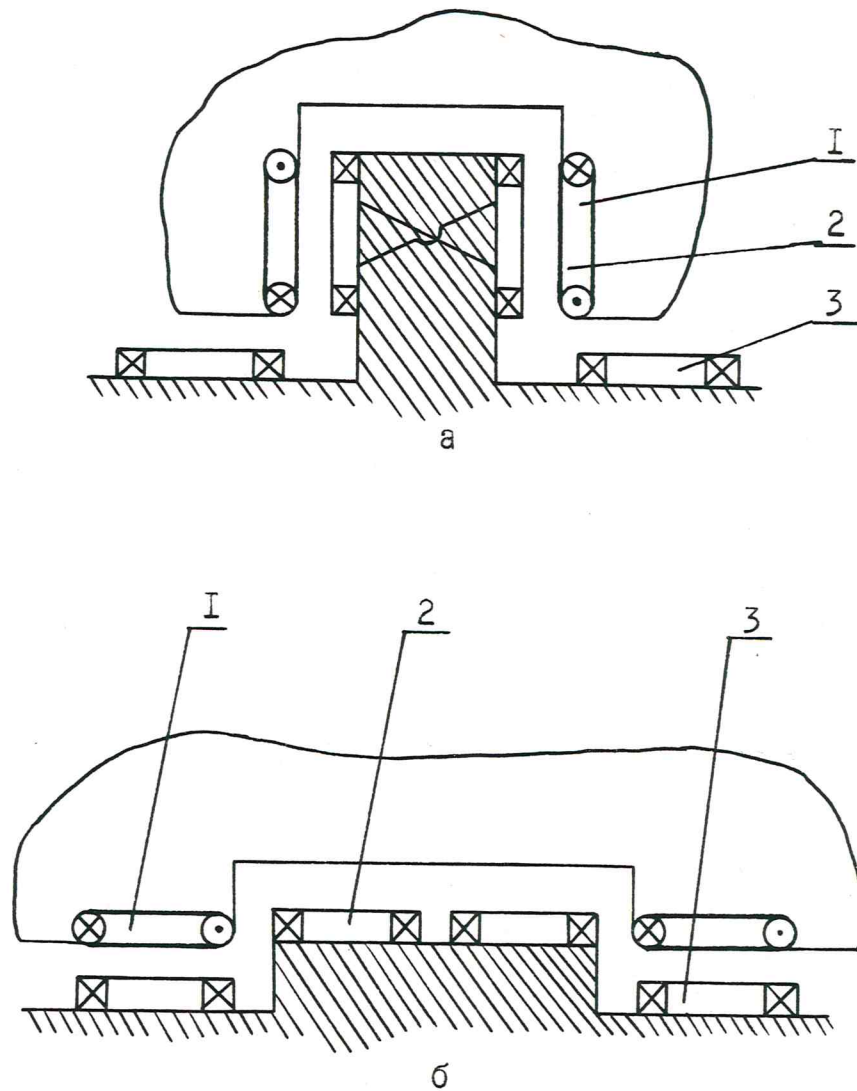
Дело в том, что в листовом вторичном элементе связь между вихревым током в какой-либо узкой пространственной области и вызвавшим его магнитным полем СПОВ носит локальный характер. Каждая магнитная силовая линия СПОВ, пронизывающая листовую вторичный элемент, генерирует при своем движении вихревые токи, которые пытаются размагнитить данный участок листа. В результате, выражаясь образно, в листе, как в зеркале, формируется магнитное отражение СПОВ, которое движется синхронно с ним с некоторым отставанием, зависящим от скорости СПОВ. При изменении скорости структура магнитного отражения трансформируется.

В отличие от этого, ток в дискретном контуре определяется интегральной величиной магнитного потока СПОВ, пронизывающего поверхность, ограниченную петлями контура, а конфигурации токовых линий во вторичном элементе не зависят ни от формы, ни от скорости, ни от боковых смещений СПОВ и жестко зафиксированы в пространстве.

Важнейшим направлением совершенствования УЭДП с ЯК стала разработка конструктивных решений (получивших в отечественной литературе название комбинированных систем синхронной тяги и направления (КССТН) экипажа [12]), в которых контура направления одновременно используются в качестве якорных катушек ЛСД (рис. 2.6). На сегодняшний день эти устройства (автор - Наока Маки [13]) получили признание среди специалистов по ВСНТ во всем мире. Не только НИИ ЯНЖД с большим постоянством продолжает заниматься совершенствованием КССТН 7-км полигона в Миядзаки, но и канадские специалисты в своем новом проекте пассажирского транспорта на ЭДП предусмотрели использование КССТН [14]^{*)}

* В СССР КССТН с петлевыми ЯК исследовалась в Ер.ПИ. По результатам НИР было принято решение о строительстве 1,5-км полигона вблизи г. Раздан. [15].

Конструкции ЛЭМПЭ с комбинированной системой
тяги и направления петлевого типа



- а - ЛЭМПЭ с вертикальными СПОВ;
б - ЛЭМПЭ с горизонтальными СПОВ.

1 - СПОВ; 2 - обмотки комбинированной системы;
3 - короткозамкнутые контура подвески

Рис. 2.6

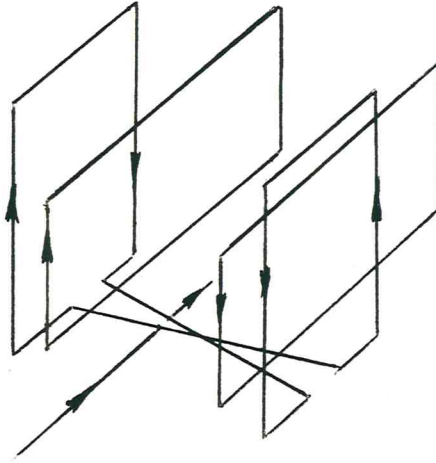
Каждая якорная катушка КССТН с вертикальными СПОВ состоит из двух одинаковых прямоугольных петель, расположенных друг напротив друга и соединенных электрически между собой таким образом, чтобы поток взаимной индукции между ними был положителен (рис.2.7). По существу, такая ЯК может быть получена путем расщепления катушки с удвоенным количеством витков на две простые катушки с последующим разнесением их в пространстве в аксиальном направлении.

СПОВ расположены на экипаже также попарно, причем полярность катушек, образующих пару, противоположна. Присимметричном расположении экипажа относительно осевой линии полотна потокосцепление левой и правой СПОВ каждой пары с противоположащими им петлями якорной катушки равны. В этом случае ЭДС, наводимые в левой и правой петлях ЯК при движении экипажа, также равны между собой, но направлены встречно и поэтому уравнивают друг друга.

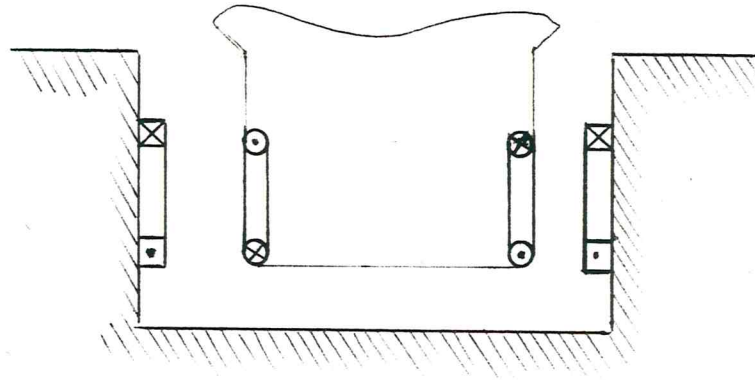
При смещении экипажа из положения симметрии один из боковых просветов в устройстве уменьшается, в то время как другой увеличивается. При сближении СПОВ с петлей ЯК потокосцепление возрастает, при увеличении же расстояния - наоборот, уменьшается. Вследствие этого ЭДС в приближающемся ряду петель превышает по величине ЭДС в петлях удаляющегося ряда. Под действием результирующей ЭДС в каждой ЯК появляется вихревой **уравнительный ток**. Его направление таково, что возникающее при этом электродинамическое усилие препятствует боковому смещению, т.е. носит восстанавливающий характер.

Предложение использовать такие катушки направления для создания тягового усилия впервые было опубликовано в [16]. Здесь показано, что для этого достаточно подсоединить катушки к источнику питания ЛСД таким образом, чтобы тяговый ток фазы распределился между петлями ЯК поровну. Способ соединения петель в катушке обуславливает протекание тягового тока в петлях во взаимно противо-

КССТН с вертикальными СПОВ



а



б

а - схема растекания тягового тока по петлям якорной обмотки; б - схема растекания вихревого тока

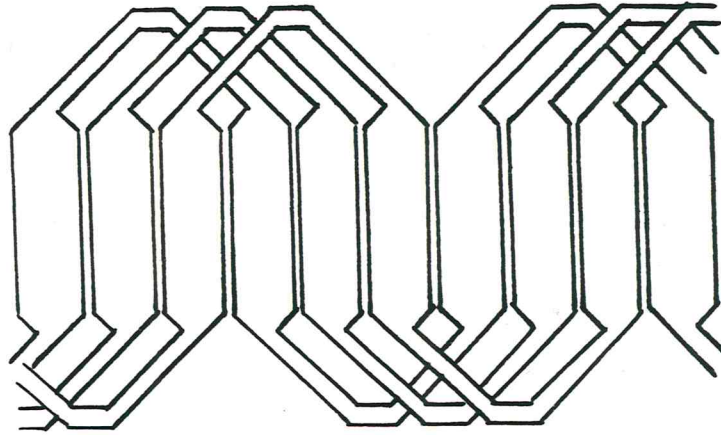
Рис. 2.7

ложных направлениях, но поскольку СПОВ в каждой паре также имеют встречную полярность, сила тяги, возникающая при взаимодействии левых петель с левым рядом СПОВ, имеет такое же направление, что и сила взаимодействия правого ряда петель с правым рядом СПОВ.

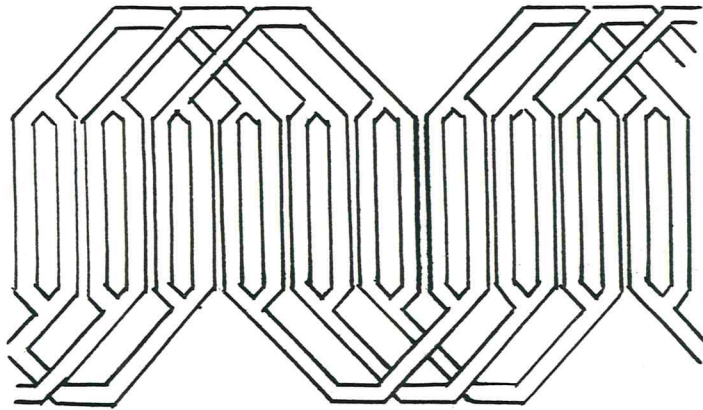
Стремление расширить функциональные возможности двигателей с волновой обмоткой якоря привели к разработке в ФЭИ АН Латв.ССР ряда технических решений, схематически изображенных на рис.2.8 [17] , [18] . Эти устройства также способны выполнять функции тяги и подвески (направления) подвижной части. С этой целью каждый фазный проводник обмотки якоря на активном участке или в зоне лобовых частей расщеплен на две параллельные ветви, образующие короткозамкнутые контура. При движении СПОВ над расщепленными проводниками в них наводятся ЭДС. Вследствие фазового сдвига между ЭДС в короткозамкнутом контуре появляется вихревой уравнивающий ток, взаимодействие которого со СПОВ приводит к появлению электродинамического усилия, осуществляющего подвеску (направление) экипажа. По мнению авторов [18] , ЛСД с массивными проводниками обмотки статора (рис.2.8а) в состоянии обеспечить разгон и подвеску экипажа массой 38 т, имеющего конфигурацию фюзеляжа самолета ИЛ-18.

Оригинальная конструкция якорных катушек КССТН, обеспечивающих не только тягу и направление, но также и подвес транспортного средства, разработана в ХПИ им.В.И.Ленина [19] , [20] . Их конфигурация представлена на рис. 2.9. Каждая катушка состоит из двух петель, расположенных в вертикальной плоскости одна над другой. Лобовые части катушки отогнуты в сторону ОВ и охватывают ее. Существенно, что площадь вертикального участка нижней петли превосходит площадь вертикального участка верхней петли, так что даже при симметричном расположении ОВ относительно отогнутых частей ЯК поток взаимоиндукции между ОВ и ЯК не равен нулю и по катушке протекает вихревой ток. Взаимодействие прямолинейных проводников

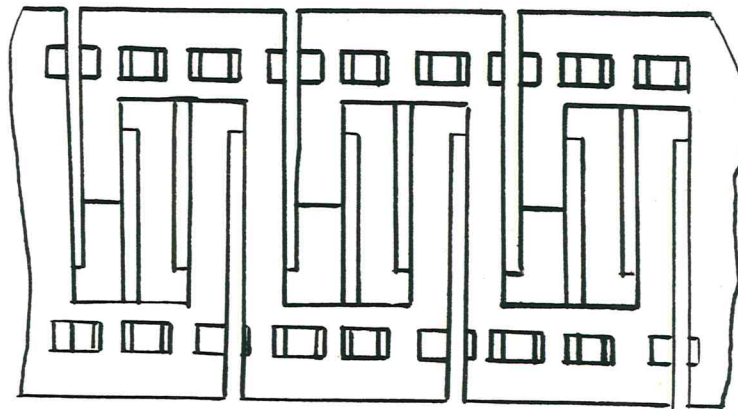
Волновые якорные обмотки комбинированных ССТН



а



б



в

а, б - обмотки якоря, обеспечивающие тягу и подвеску индуктора;
 в - обмотка якоря, обеспечивающая тягу и направление индуктора.

Рис. 2.8

Комбинированная система тяги, подвеса и направления
экипажа транспортного средства

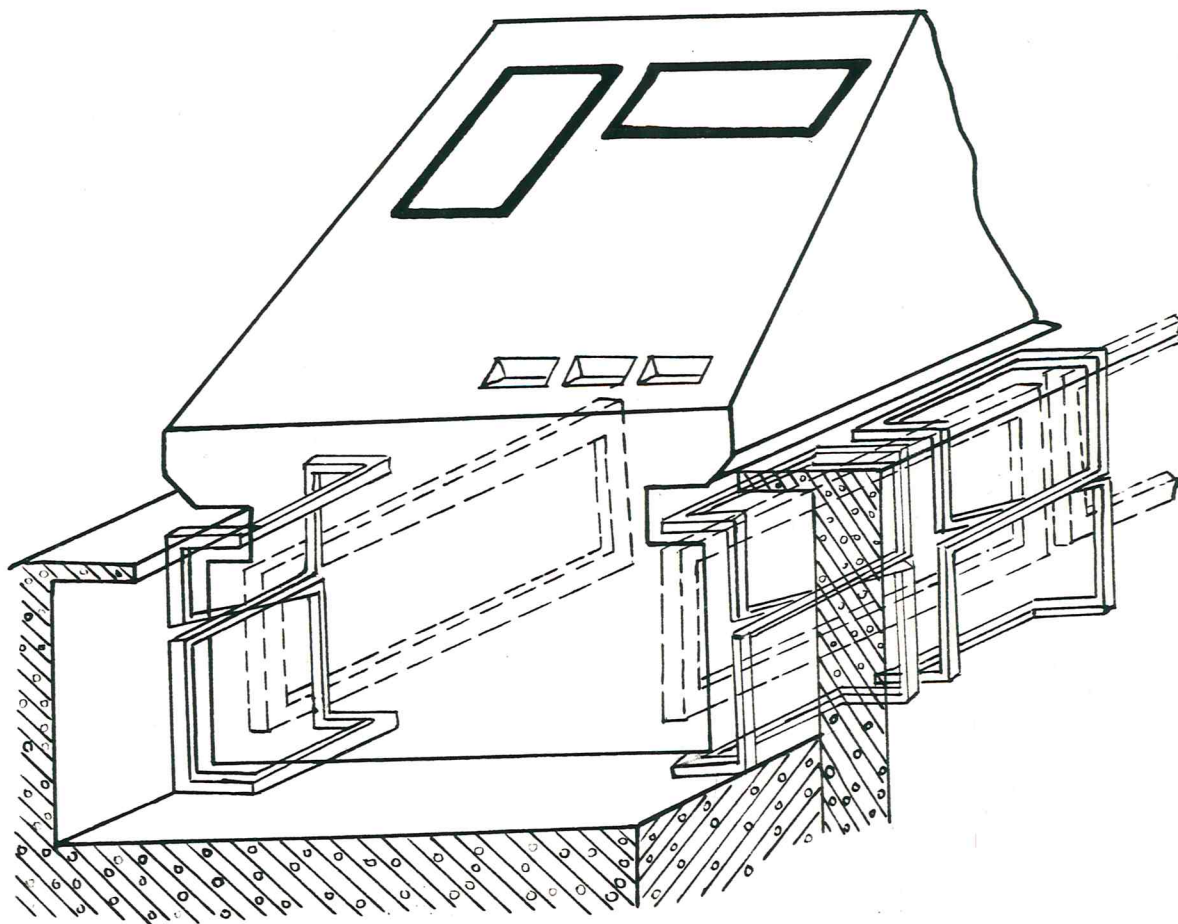


Рис. 2.9

ОВ с отогнутыми частями ЯК создает силу подвеса, а взаимодействие верхней стороны ОВ с лежащей напротив нее парой продольных проводников ЯК - силу горизонтального направления экипажа. Тяговое усилие создается при взаимодействии поперечных направлению движения участков ЯК и ОВ. По отношению к источнику питания верхняя и нижняя петли ЯК включены параллельно, но вихревым током они обтекаются последовательно. В результате, в одной из петель направления вихревого и тягового токов противоположны, а в другой - совпадают.

КССТН являются достаточно сложными устройствами. Их разработка сопряжена с рядом трудностей, заключающихся в необходимости устранения взаимного влияния тягового и левитационного процессов. Не всегда это оказывается возможным, особенно в случае совмещения в одном устройстве тяговых, подвесных и направляющих функций.

2.2. Обзор национальных исследовательских программ в области высокоскоростного наземного транспорта на электродинамическом подвесе

Экспериментальные исследования по ЭДП ВСНТ выполнялись практически во всех развитых капиталистических странах, однако наибольшие успехи были достигнуты в США, Японии и ФРГ. В Англии, Канаде и СССР работы над аналогичными проектами имели сравнительно скромное финансирование и поэтому не вышли за лабораторный уровень.

2.2.1. Исследовательские программы США

В США основные усилия концентрировались на исследовании УЭДП с листовым путевым полотном. Министерство транспорта США с начала 1971 г. финансировало компанию *Ford Motors* и Стэнфордский НИИ для проведения оценочных исследований систем на магнитной подушке. Эта программа, получившая впоследствии наз-

вание *TMLV (Tracked Magnetically Levitated Vehicle)* преследовала две цели - теоретическая разработка и изучение транспортной системы для пассажирских перевозок и - разработка и испытания при скорости 134 м/с ракетных салазок [21] .

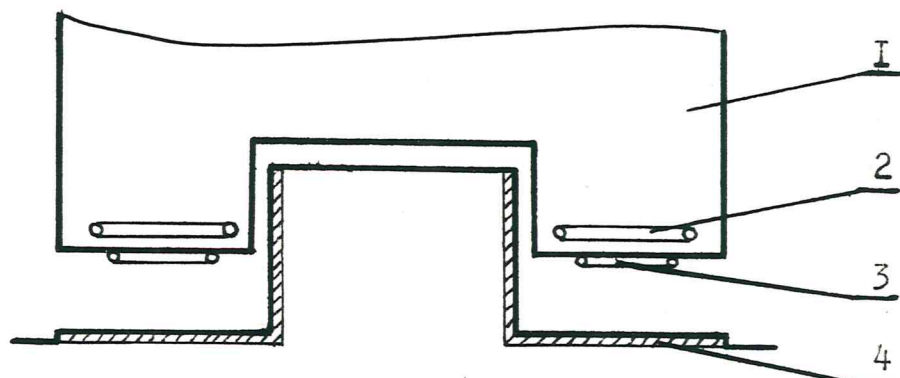
В процессе выполнения программы в Стэнфордском НИИ была построена и испытана модель транспортного средства массой 480 кг [22] . Разгон и торможение модели при движении по 122-метровой направляющей осуществлялось при помощи лебедки. Максимальная скорость движения - 51,4 км/час. Для бесконтактной подвески и одновременно направления экипажа на центральном 6-метровом участке направляющей, содержащем алюминиевые уголки, на экипаже устанавливались 4 сверхпроводящих магнита размером 0,32x0,27 м и МДС 49 кА. Наибольшая высота подвески от середины СПОВ до поверхности пути - 0,1 м.

Результатом выполнения программы *TMLV* стал проект 30-тонного экипажа, рассчитанного на 80 посадочных мест. Подвеска и направление экипажа - электродинамического типа, использующая в качестве вторичного элемента алюминиевый уголок - осуществляется при помощи восьми СПОВ размером 0,5x1,5 м и МДС 350 кА. Для привода экипажа предназначены 2 вентилятора, приводимые во вращение регенеративными газовыми турбинами. Путь имеет в сечении форму перевернутого Т (рис. 2.10) .

Одновременно с указанными работами группой под руководством Генри Колма из национальной лаборатории им. Френсиса Биттера при Массачусетском технологическом институте разрабатывался проект *Magneplane* . Проект финансировался Национальным научным фондом. Кроме МТИ в проекте принимали участие промышленные концерны *Raytheon Company* и *United Engineers and Constructors*.

Подобно программе *TMLV* , исследования по проекту *Magneplane* прошли 2 этапа - разработка собственно полномасштабной транспортной системы и экспериментальное исследование ее натурной модели, выполненной в масштабе 1:25.

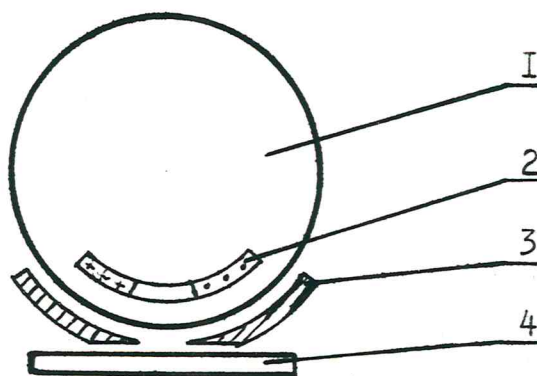
Сечение модели Стэнфордского НИИ



I - экипаж; 2 - СПОВ; 3 - демпферные обмотки нормальной проводимости; 4 - алюминиевая направляющая.

Рис.2.10

Сечение масштабной 1:25 модели МТИ



I - экипаж; 2 - СПОВ; 3 - левитационные полосы; 4 - обмотки ЛСД.

Рис. 2.11

Ключевым моментом, определяющим все своеобразие и оригинальность компоновочной схемы тягово-левитационной системы *Magneplane* является выбор путевого полотна в виде вогнутого лотка, продиктованный соображениями о стабильности пути как главном критерии эффективности [23]. Путь для магнеплана представляет собой 120-градусный сектор цилиндрического лотка, выполненный из алюминиевого листа толщиной 0,01 м. В нижней части пути предусмотрена щель с углом раствора 40° для размещения в ней активных обмоток системы тяги.

В основу конструкции вагона *Magneplane* положен фюзеляж самолета Боинг-707. Под днищем вагона по дуге окружности с углом раствора 120° расположены 16 эллиптических седлообразных катушек. Катушки должны быть выполнены однослойными из полого сверхпроводника, по трем параллельным каналам которого под давлением 8,3 кПа прокачивается сверхкритический гелий. Габаритные размеры каждой СПОВ - $3,3 \times 2,4$ м, полюсное деление 2,75 м, МДС - $1,25 \times 10^6$ А.

СПОВ создают распределение магнитного поля с явно выраженным максимумом ниже центральной линии вагона. Наличие такого магнитного "киля" оказывается достаточным, чтобы, с одной стороны, обеспечить центрирующую силу и выпрямляющий момент и тем самым гарантировать устойчивость, с другой стороны, при этом облегчается регулирование тяговой силы.

Расположенная между левитационными алюминиевыми полосами активная часть пути представляет собой волновую трехфазную обмотку, развернутую в направлении движения. Ее изогнутые стержни рассчитаны на среднеквадратичный ток 1600 А на одну фазу и должны выполняться из проводника малого поперечного сечения, чтобы уменьшить потери от вихревых токов. Шаг проводников рассчитан на синхронную скорость 100 м/с при частоте тока 60 Гц.

Система управления ЛСД обеспечивает не только синхронное ускорение и замедление экипажа, но также активно демпфирует вертикальные и угловые колебания посредством регулирования вертикальной силы, создаваемой двигателем.

Модель поезда *Magneplane*, построенная и испытанная на полигоне лаборатории фирмы *Raytheon*, в основных чертах повторяла конструкцию полномасштабной системы (рис.2.II). 98 из 116 метров полигона были оснащены волновыми якорными обмотками ЛСД и левитационными полосами. На участке разгона длиной 55 м алюминиевые полосы были заменены стеклопластиком. Торможение на последнем 18-метровом участке осуществлялось за счет вихревых токов.

На первом этапе исследовались динамические характеристики экипажа весом 16 кг, оборудованного самарий-кобальтовыми постоянными магнитами. При этом была продемонстрирована возможность трогания с места с хорошим ускорением и устойчивой синхронностью. Испытания были успешно продолжены со вторым экипажем весом 14 кг (без жидкого гелия), в котором постоянные магниты были заменены тремя седлообразными сверхпроводящими катушками галетной конструкции. Каждая СПОВ обладала МДС 45 кА и создавала на уровне пути магнитную индукцию 0,6 Т. Система охлаждения катушек - погружная, с запасом жидкого гелия на 3 часа работы.

В экспериментальном энергорегулирующем устройстве использовался ионный преобразователь тока с частотой 400 Гц и ток с частотой 0 ± 132 Гц, что позволило разогнать экипаж до скорости 25 м/с.

Были проведены испытания системы управления ЛСД в режиме с фиксированным сдвигом магнитных осей якоря и СПОВ, когда ускорение экипажа достигалось путем управления амплитудой якорного тока. Одновременно с помощью ЛСД осуществлялось активное демпфирование вертикальных колебаний экипажа, для чего на нем устанавливался датчик ускорений.

Успешно проведенные испытания модели *Magneplane* позволили авторам проекта прийти к заключению о возможности технической реализации транспортной системы на существующем уровне технологии и высокой ее конкурентоспособности. Несмотря на это, в июне 1975 г. финансирование программы *Magneplane* было прекращено, как впрочем, и всех остальных программ в области пассажирского наземного транспорта в США. По-видимому, такое решение было обусловлено сложившейся в официальных кругах США точкой зрения, что если поезда на магнитной подушке оправдают себя, то в случае необходимости они всегда могут быть куплены за границей [24].

В 1978 г. Министерство Обороны США предприняло первые попытки оценить состояние техники электромагнитной тяги и сконцентрировать национальные усилия на выполнении военно-прикладных программ в этой области [25]. С этой целью была учреждена консультативная группа (в ее состав вошли и специалисты по магнитному подвесу - Генри Колм и Пауэлл) и организовано техническое совещание по обмену опытом. Совещание было проведено в декабре 1979 г. в Военно-Морской Академии США, Аннаполис. В его работе приняли участие 60 ученых и инженеров, представлявших широкий спектр научных дисциплин. Проанализировав успехи, достигнутые в разработке скользящих контактов с высокой плотностью тока, рельсовых пушек, ЛСД и устройств ЭДП со СПОВ, мощных источников питания, совещание пришло к выводу о наличии широких возможностей использования ЛЭМПЭ в целом ряде военных областей, включая:

- замену обычных артиллерийских пушек электромагнитными;
- разработку катапульта для разгона самолетов;
- заброску грузов непосредственно в космос;
- развитие технологии ударной плавки, использующей снаряды с гиперскоростями и др.

В общем объеме исследовательских программ военно-прикладного характера, выполняемых в США, особого внимания заслуживают две программы, направленные на разработку, изготовление и испы-

тание высокоэффективных ускорителей с преобразованием более чем 50% электрической энергии источника в кинетическую энергию снаряда. Первая из них посвящена разработке так называемых коаксиальных ускорителей, вторая касается вопросов совершенствования рельсовых пушек путем использования СПОВ для усиления магнитного потока возбуждения.

Коаксиальный ускоритель представляет собой, по существу, трубчатый линейный двигатель, якорные катушки которого имеют круглую форму и размещены одна за другой во взаимно параллельных плоскостях. Подвижная часть устройства - челнок - содержит одну или несколько также круглых ОБ, расположенных аксиально с катушками "ствола". В отличие от РП коаксиальные ускорители имеют ускоряющие и замедляющие секции, а рабочий цикл челнока состоит из трех фаз: ускорение груза (снаряда), гашение скорости челнока и возврат его в предпусковое состояние.

Питающее напряжение выдается на каждую якорную катушку только при движении челнока мимо нее. Оптимальный закон изменения якорного тока - синусоидальный. Первую половину периода разряда якорная катушка ускоряющей секции создает тянущее усилие, а во вторую половину - толкающее. Благодаря большой величине коэффициента магнитной связи между ОБ и якорными катушками, коаксиальный ускоритель способен создавать приблизительно в 100 раз большее тяговое усилие, чем РП при одинаковых токовых нагрузках.

По образному выражению Г.Колма, рельсовые преобразователи и коаксиальные ускорители соотносятся приблизительно так же, как дирижабли и аэропланы [26]. Подобно тому, как на заре развития воздухоплавания основное внимание уделялось менее сложным по конструкции дирижаблям, проводимые в настоящее время в США исследования по линейному электромеханическому преобразованию энергии почти целиком направлены на разработку РП. Между тем, коаксиальные ускорители, как и аэропланы, обладают некоторыми уникальными осо-

бенностями. Важнейшими среди них являются:

- возможность ускорения снарядов очень больших размеров и массы;
- высокий (свыше 50 %) КПД;
- длительный срок службы, обусловленный отсутствием физического контакта между челноком и направляющей;
- возможность регулирования скорости челнока в процессе пуска;
- равномерное распределение усилия по длине челнока;
- менее жесткие требования к источнику питания.

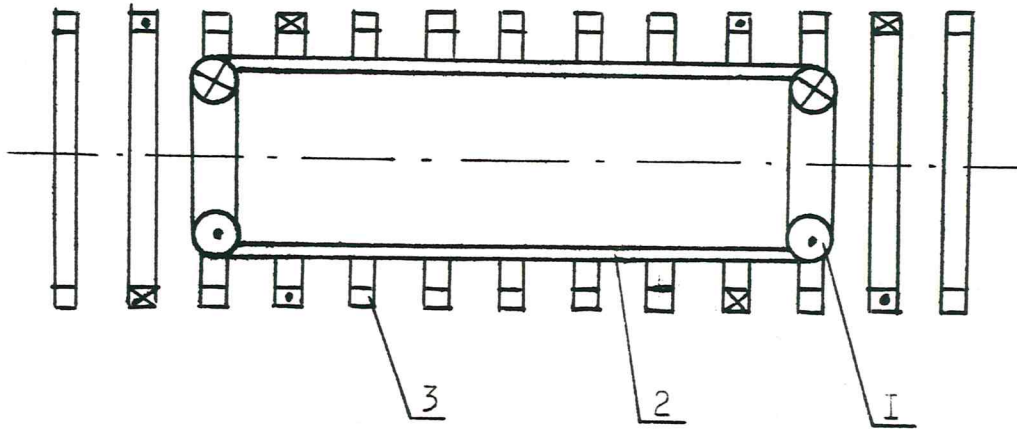
На протяжении 1972-1984 г.г. в США разрабатывались два типа КУ с ОВ постоянного тока - грузовые катапульты (*Mass Driver*) [27] и спиральные рельсовые ускорители (*helical rail accelerator, sliding coil accelerator, repulsion coil projector, quench gun*) [28],[29].

Наиболее широкое освещение в общедоступных источниках информации получили разработки МТИ, хотя, по-видимому, аналогичные исследования КУ проводятся и в других научно-исследовательских центрах [26].

Идея создания грузовой катапульты - мощного двигателя для заброски грузов на низкие околоземные орбиты, ускорения массивных тел в космосе - зародилась под впечатлением успехов, достигнутых при разработке ЛСД и устройств ЭДП со СПОВ для экипажей системы *Magnetrane*, и впервые была выдвинута О'Нейлом в [30]. В 1977 г. в МТИ была построена упрощенная коаксиальная модель такого устройства, обеспечивающая разгон челнока с ОВ нормальной проводимости с ускорением $35g$. С середины 1978 г Принстонский университет совместно с МТИ начал разработку второй, более совершенной модели - МД2 (*Mass Driver Two*), приближенной по своим характеристикам к полномасштабной установке космического базирования и рассчитанной на ускорение челнока $500g$ [31].

Якорная часть МД2 состоит из 118 кольцевых катушек нормальной проводимости с внутренним диаметром 0,13 м, расположенных друг за другом с шагом 2,46 см. Челнок, длиной 0,2 м и массой 1 кг, движется в вакуумированной стеклянной трубе, охваченной по наружной по-

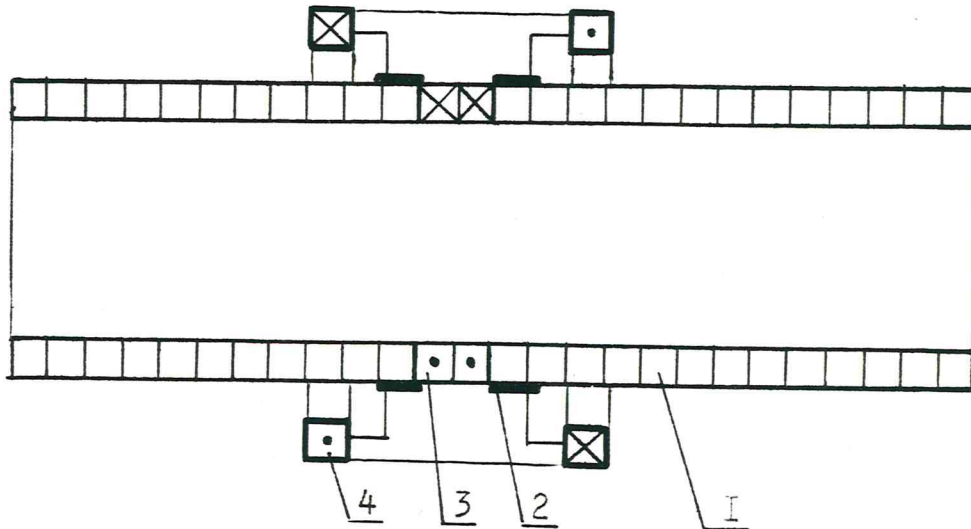
Грузовая катапульта "Mass Driver Taso "



1 - СПОВ; 2 - челнок; 3 - якорная катушка ЛСД

Рис. 2.12

Спиральный рельсовый ускоритель



1 - спиральная обмотка якоря; 2 - активированные секции;
3 - щетки; 4 - обмотка возбуждения

Рис. 2.13

верхности якорными катушками. На внутренней поверхности трубы равномерно по периметру окружности расположены шесть продольных медных полос, предназначенных для электродинамического направления и подвески челнока. Сам челнок выполнен в виде тонкостенной алюминиевой трубы с наружным диаметром 0,067 м, на торцевых поверхностях которой установлены две идентичные по конструкции короткозамкнутые СПОВ. Каждая ОВ намотана из 340 витков круглого Nb-Ti сверхпроводника диаметром 0,71 мм и для повышения теплоемкости пропитана сплавом Вуда [32]. С целью защиты сверхпроводника от теплопритоков излучением, а также электромагнитного экранирования переменной составляющей магнитного поля якоря ОВ охвачена по наружной поверхности медным обручем. Для охлаждения челнока до температуры жидкого гелия, индуктивной запитки СПОВ до 44 кА и придания челноку начальной скорости порядка 5 м/с в МТИ разрабатывалась криогенная станция, стыкуемая непосредственно с ускоряющей секцией устройства.

59 катушек ускоряющей секции катапульты образуют двухфазную систему. Питающее напряжение выдается одновременно на группу из четырех катушек одной фазы, между которыми в данный момент времени находятся СПОВ. Таким образом, возбужденными оказываются две ближайšie к СПОВ якорные катушки, принадлежащие к одной фазе. Катушка, находящаяся перед СПОВ, создает силу тяги, катушка, оставшаяся позади, создает толкающее усилие. Импульсы якорного тока создаются одним полным периодом колебательного разряда банка конденсаторов, общего для всех катушек фазы. Синхронизация коммутации катушек с движением челнока осуществляется при помощи оптической следящей системы.

Имеется сообщение о проведении частичных испытаний катапульты МД2 с челноком, содержащим охлажденные до температуры жидкого азота ОВ. В качестве обмоточного провода использован алюминий, как материал, обладающий более высоким отношением удельной проводимости к плотности, чем медь. Челнок двигался в воздушной

среде и в течение 0,2 с выдерживал практически ту же токовую нагрузку, что и СПОВ, нагреваясь за это время не более чем на 40° [33] .

После проведения испытаний установки МД2 со СПОВ планируется увеличить ее длину сначала до 6,4 м, а при необходимости и до 10 м. Максимальная скорость челнока должна возрасти при этом от 112 м/с до 224 м/с. Ожидается, что будет достигнуто среднее ускорение челнока $650g$.

Демонстрационная модель спирального рельсового ускорителя, предназначенного для разгона 4-кГ радиоуправляемого планера с ускорением $90g$ до скорости 60 м/с и заброски его на высоту около 100 м, была построена и испытана в МТИ [30] . Модель выполнена в виде мобильной установки с двумя параллельными направляющими длиной 6 м. Челнок каждой направляющей имеет массу 4,05 кГ и содержит две круглые ОВ нормальной проводимости, охватывающие направляющую по наружной поверхности. Кроме ОВ на челноке установлены щетки, запитывающие секции спирального якоря, расположенные между фронтальной и тыловой ОВ челнока. Поскольку ОВ имеют встречную полярность, фронтальная ОВ отталкивается от запитанного сектора якоря, в то время как тыловая ОВ притягивается к нему. В процессе испытаний была продемонстрирована возможность разгона челнока с ускорением $300g$. По мнению разработчиков, при соответствующем масштабировании эта установка с успехом может быть использована для разгона грузов массой несколько тонн до скорости порядка 100 м/с.

На 18 Международной конференции по электрической тяге (1985г) подчеркивалось, что среди всех типов электромагнитных ускорителей только коаксиальные ускорители зарекомендовали себя с положительной стороны. Наиболее обещающими признаны комбинированные устройства запуска, в которых начальное ускорение обеспечивается электромагнитным способом, а вторая и третья ступени - при помощи химической тяги. Широкое использование РП и КУ в целях исследования

космоса начнется, по мнению авторов [34], не ранее 2010 года.

2.2.2. Япония: опыт создания ЛЭМПЭ со СПОВ на полигоне пассажирского ВСНТ в Миядзаки

Исследование возможности создания транспортной системы на ЭДП начались в Японии в начале 1970 гг. В разработках, финансируемых Министерством транспорта и Японскими национальными железными дорогами (ЯЖД), приняли участие фирмы Тосиба, Хитачи, Мицубиси. В 1971 году для установления функциональных возможностей магнитного подвеса с индукционным отталкиванием и линейного синхронного двигателя было создано транспортное устройство LSM-200 размером 4 м х 1,5 м х 0,8 м массой 2 тонны, которое 11 февраля 1972 г. на полотне длиной 0,22 км при скорости 50 км/ч развило тяговое усилие 4 кН. На LSM-200 был впервые в мире установлен полномасштабный сверхпроводящий электромагнит, перемещающийся линейно вдоль путевого полотна.

В том же 1972 году к 100-летию Японских национальных железных дорог с целью проверки ходовых характеристик экипажа, работающего на принципе ЭДП, при наличии пассажиров было испытано транспортное средство ML-100 размерами 7 м х 2,5 м х 2,2 м массой 3,5 тонны. Электродинамический подвес осуществлялся за счет четырех сверхпроводящих магнитов, взаимодействующих с дискретной путевой структурой. Линейный асинхронный двигатель с тяговым усилием 9,5 кН на полотне длиной 0,48 км привел в движение ML-100 со скоростью 60 км/ч. Горизонтальная стабилизация экипажей LSM-200 и ML-100 осуществлялась с помощью механических направляющих систем.

Для проверки полностью бесконтактного движения в 1974 году был создан экипаж ML-100 А. Здесь для подвеса, тяги и стабилизации использовались восемь сверхпроводящих магнитов, размещенных в четырех L-образных криостатах. ML-100 А имел длину 5 м, ширину 2,2 м, высоту 1,4 м, массу 3,6 тонны. Линейный синхрон-

ный двигатель, имея тягу 10 кН, приводил в движение экипаж со скоростью 60 км/ч на участке длиной 0,48 км.

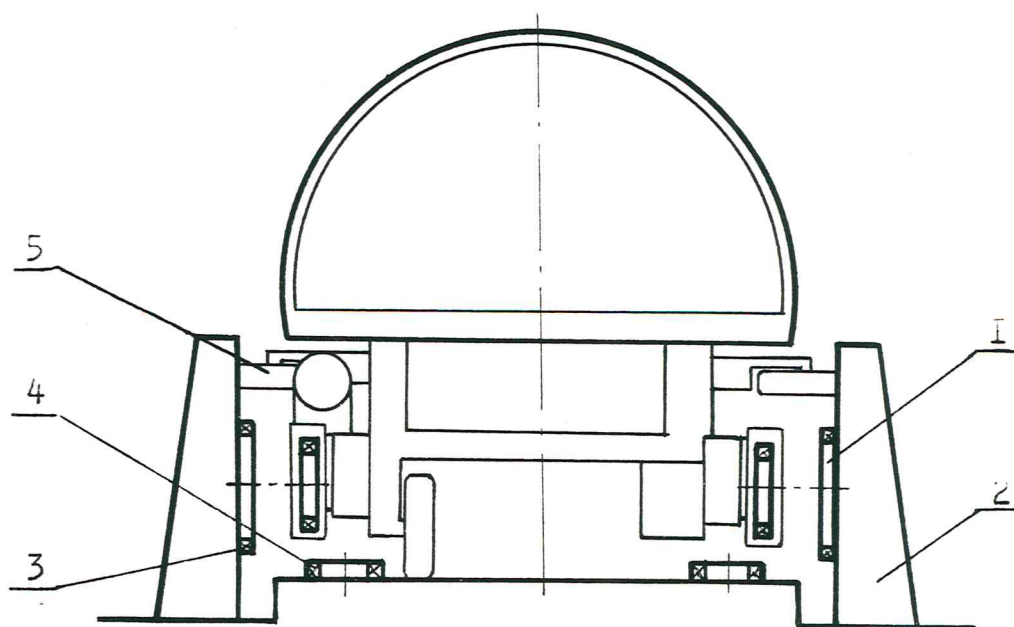
Наконец, в 1976 году был создан полномасштабный экипаж ML-500, на котором осуществлялась проверка его возможностей при движении со скоростью порядка 500 км/ч. Экипаж, который имел размеры 13,5 м x 3,7 м x 2,9 м и массу 10 тонн, развивал максимальное тяговое усилие 43 кН. Для его испытаний в префектуре Миядзакэ был построен 7-км полигон. 21 декабря 1979 года экипажем ML-500 была достигнута рекордная скорость 517 км/ч при высоте подвеса 100 мм.

Экипаж ML-500 был разработан для путевого полотна в виде перевернутой буквы "Т". С точки зрения жесткости вагона, обеспечения необходимого пространства для размещения под полом вагона бортовой аппаратуры такое полотно оказалось неудобным. Устранение этих недостатков стало возможным при переходе к U - образному сечению путевого полотна и соответствующего ему экипажа.

В ноябре 1980 года был создан экипаж MLU-001-I для U - образной путевой структуры, имеющий размеры 10,1 м x 3 м x 3,3 м и массу 10 тонн. Отличительной особенностью этого экипажа явилось использование для подвеса, тяги и направления одних и тех же сверхпроводящих магнитов, что привело к уменьшению массы вагона, сокращению числа структурных элементов экипажа и уменьшению нагрузки на систему охлаждения. В августе 1981 года был завершён первый этап испытаний MLU-001-I, в ходе которых достигнута скорость 250 км/ч на четырехкилометровой испытательной линии. В ноябре 1981 г. длина путевого полотна была доведена до 4,7 км и на ней начаты ходовые испытания двух вагонов головного - MLU-001-I и хвостового MLU-001-3 в сцепке.

В настоящее время начаты испытания сцепки из трех вагонов на U - образном полотне длиной 7 км. Кроме того, предполагается также провести ходовые испытания одного вагона со скоростью 400 км/ч. В качестве заключительного этапа разработок предполагается провести ходовые испытания реального экипажа на линии длиной 40 км.

Экипаж ЯНЖД МЛУ - 001



- 1 - якорные обмотки; ЛСД; 2 - полотно;
 3 - СНОВ; 4 - контура подвески;
 5 - направляющие колеса

Рис. 2.14

При создании опытных экипажей ключевым моментом, по мнению японских специалистов, является разработка СПОВ и криогенного оборудования к ним. Этой проблеме с самого начала уделялось центральное внимание. Достаточно отметить, что только в течение 1970-79г.г было создано 43 СПОВ 14 различных типов [35]. В результате непрерывного совершенствования конструкций СПОВ и криостатов разработчикам удалось более чем в 3 раза повысить намагничивающую силу единичной катушки (с 250 до 840 кА) при том же материале сверхпроводника - Nb-Ti. Значительно были улучшены и массо-габаритные показатели криостатов, бортовых холодильных установок.

Наиболее совершенные СПОВ установлены на экипаже MLU-001. Их параметры, а также параметры СПОВ предыдущей модели, ML-500, приведены в табл. 2.1 [36], [37].

Таблица 2.1.

Параметры СПОВ, установленных на экипажах ML-500 и MLU

Параметры СПОВ	ML-500	MLU-001
1	2	3
геометрическая форма	плоская, в плане -	рейстрек
длина x ширина x шаг, м	1,65x0,5x2,1	1,7x0,5x2,1
сечение окна обмотки, мм	71x71	49x78
количество витков	560	1000
рабочий ток, А	804	700
магнитодвижущая сила, кА:		
максимальная		840
рабочая	450	700
плотность тока, А/мм ²	89	183
максимальная индукция, Тл	2,9	4,7
Запасенная энергия, кДж	196	522
индуктивность, Гн	0,61	2,13
тип обмотки	галетная с каналами для охлаждения	катушечная, пропитанная

1	2	3
сверхпроводник:		
вес, кг	116	100
размеры, мм	2x3	1,2x2,6
коэффициент заполнения медью	6	2

Отличительной чертой экипажей MLU по сравнению с моделью ML является многофункциональность использования СПОВ. А именно, каждая СПОВ, установленная на экипаже, развивает при движении силу тяги, силу подвески, а при отклонении экипажа от осевой линии полотна - боковую восстанавливающую силу. Достигается это путем взаимодействия СПОВ, установленных на экипаже вертикально и в два ряда по четыре полюса (рис.2.14) с двумя системами контуров, уложенных на путевом полотне. Якорные обмотки ЛСД I, расположенные вдоль боковых поверхностей направляющей 2, электрически соединены попарно между собой и по известным правилам запитаны от трехфазного источника питания. Совместно со СПОВ они образуют КССТН. Короткозамкнутые контура 4, размещенные в донной части путевого полотна, при взаимодействии с теми же СПОВ создают подъемное усилие. Магнитодвижущая сила СПОВ распределяется между обеими системами в пропорции: 450 кА - система тяги и направления, 250 кА - система подвески [38] .

Размеры наземных катушек испытательного полигона в Миядзакки представлены в табл.2.2 ([36] , [38] , [39]) .

Таблица 2.2.
Параметры наземных катушек полигона в Миядзакки

Наименование параметра	Катушки КССТН	Катушки подвески
длина, м	1,1	0,45
ширина, м	0,7	0,38
шаг намотки, м	1,4	0,7
количество витков	32	52

13 слоев, 4 ряда

1	2	3
поперечное сечение, мм		80x80
сопротивление, мОм	118,5	22,5
индуктивность, мГн	4,48	1,5
материал		электрический алюминий
ток фазы, А	550	
МДС фазы, кА	33,9	
максимальная частота, Гц	34	

Транспортная система MLU-001 ЯНЖД обнаруживает ряд общих черт с проектом США *Magnetrane*. Кроме упоминавшейся ранее вогнутой формы путевого полотна, здесь можно указать также циркуляционное охлаждение СПОВ, ориентированность на многофункциональное использование СПОВ (тяга, подвес, направление) и элементов путевой структуры (подвес - направление в *Magnetrane* и направление - тяга в MLU - 001), выбор в качестве привода ЛСД.

Однако следует учитывать, что если основной упор в проекте *Magnetrane* сделан на оригинальность формы СПОВ и вторичного элемента, т.е. основные усилия разработчиков были направлены на поиск пускай сложной, но оптимальной геометрии проводников, то главное направление совершенствования моделей ML и MLU японские специалисты связывали с повышением электромагнитных параметров СПОВ сравнительно простой геометрической формы, с отработкой их конструкции и технологии.

2.2.3. Кольцевой испытательный полигон в Эрлангене

Из числа стран Западной Европы наибольшие достижения в разработке проблем ВСНТ имеет ФРГ. Для объединения и централизации усилий по созданию магнитопланов на ЭДП три компании (*Siemens*, *AEG-Telefunken*, *Brown - Boveri*), работавшие в этой области, образовали совместно с правительством группу, названную GBI (*Gesellschaft für Bahntechnische Innovationen*). Эта группа построила в Эрлангене (ФРГ) испытательное кольцевое бетонное полотно диаметром 280 м, имеющее С-образную форму с наклоном 45°.

В конце 1973 г. состоялся первый пробег транспортного средства на колесах, первый полет на электродинамическом подвесе был выполнен в марте 1976г.

Первоначально теоретически изучались устройства ЭДП с листовой и дискретной путевой структурой, с нормальным и нулевым потоком [40] , [41] , [42] . Было выяснено, что дифференциальным устройствам ЭДП с двойными СПОВ, охватывающими вторичную часть, свойственны такие недостатки, как значительное расталкивающее усилие, действующее между СПОВ, увеличенный вес и слишком большие потери на охлаждение. С другой стороны, устройства ЭДП с дискретной путевой структурой требуют СПОВ с повышенной магнитодвижущей силой. Поэтому предпочтение было отдано нормальнопоточным устройствам с листовой вторичной частью.

Экспериментальное исследование взаимодействия плоских СПОВ с направляющей уголкового профиля было выполнено на экипаже ЕЕТ-01. В отличие от проекта TMLV , СПОВ, предназначенные для подвески и направления экипажа ЕЕТ-01, располагались не внутри, а снаружи полок алюминиевой направляющей [43] . Для активного демпфирования вертикальных колебаний экипажа была разработана система, управляющая магнитным потоком вспомогательных катушек нормальной проводимости, расположенных между СПОВ и вторичным элементом.

В течение 1977-1978 г.г. на полигоне в Эрлангене произведено переоборудование пути. Была демонтирована реактивная шина линейного асинхронного двигателя, применявшегося для привода экипажа ЕЕТ-01, и уложена трехфазная обмотка линейного синхронного двигателя без стального магнитопровода. С аппарата ЕЕТ-01 сняты левитационные магниты и статор линейного асинхронного двигателя и установлен индуктор ЛСД со СПОВ "MELOT", а также вспомогательный привод, включающий два вращающихся электродвигателя постоянного тока. Экипаж получил название ЕЕТ-02. Его испытания начались в феврале 1979 г [44] .

Технические данные экипажей ЕЕТ-01 и ЕЕТ-02 приведены в

табл. 2.3.

Таблица 2.3.

Параметры экспериментальных экипажей ЕЕТ-001 и ЕЕТ-002

Наименование параметра	ЕЕТ-001	ЕЕТ-002
масса экипажа, т	16	14
достигнутая скорость, км/ч	114	180
чистый зазор между экипажем и полотном, м	0,1	
тип подвески экипажа	ЭДП	колесная
вторичный элемент	алюминиевые полосы, 6000x500x20 мм	
тип приводного двигателя	двухсторонний ЛАД с коротким статором	односторонний ЛСД с воздушным сердечником
тяговое усилие, кН	22	20
полюсное деление, м		1,4
ширина обмотки, м		1,2
число проводников на полюс и фазу		6
поперечное сечение проводников, мм ²		240
наибольшая частота тока, Гц		18
СПОВ:		
назначение	подвеска	тяга
форма в плане	рейстрек	круглая
размеры, м	1 x 0,3	∅ 1,22
полюсное деление, м		1,4
сечение окна обмотки, мм	83 x 76	139 x 82
номинальный ток, А	500	1000
магнитодвижущая сила, кА	515	1050
плотность тока, А/мм ²	81	92,5
максимальная индукция, Тл	3,4	4,56
запасенная энергия, кДж	120	1090
сверхпроводник	НЬ-Тл	НЬ-Тл
сечение провода, мм	2,45 x 1,4	
коэффициент заполнения медью	5	

К началу 80-х годов в ФРГ было принято решение сосредоточить усилия на разработке альтернативной системы ВСНТ, основными чертами которой являются электромагнитный подвес и линейный синхронный

привод. Использование СПОВ в системах тяги и подвески экипажа при этом не предполагается.

2.2.4. Проекты транспортных систем на ЭДП, разработанные в Канаде и Англии

Успехи, в разработке ЛСД и устройств ЭДП со СПОВ, достигнутые в США до 1975 г., благодаря подробному освещению их в специальной и популярной научно-технической литературе, оказали огромное влияние на направление аналогичных исследований во всем мире. Практически все национальные разработки различных стран (за исключением Японии) содержали те же компоненты, что и американские проекты. В наибольшей степени сказанное относится к так называемому проекту Вольфсона [45], разработанному в Англии, а также к проекту транспортной системы Оттава-Монреаль *Maglev* (Канада) [46].

С точки зрения новизны компоновочной схемы систем тяги, подвески и направления экипажа эти проекты не отличаются оригинальностью и представляют собой, по существу, упрощенный вариант проекта *Maglevplane*. В обоих случаях направляющая выполнена плоской и состоит из двух электропроводящих полос системы подвески и направления, между которыми располагаются якорные обмотки линейного тягового двигателя. В донной части экипажа размещены СПОВ. В проекте Вольфсона каждая СПОВ создает тянущее, направляющее и поддерживающее усилия, в канадском проекте для выполнения тех же функций предусмотрены два набора СПОВ. Левитационные СПОВ расположены над проводящими полосами, СПОВ системы тяги - над якорными обмотками ЛСД.

В целом работы над этими проектами имели сравнительно скромное финансирование и поэтому не вышли за лабораторный уровень. В Канаде серьезное внимание уделялось исследованию режимов работы ЛСД на обращенной вращающейся модели [47], проблеме стыков между собой отрезков левитационных полос, технико-экономическими иссле-

дованиями полномасштабной системы. В последние годы особое значение придается разработке легких СПОВ и криостатов, совершенствованию аэродинамических характеристик экипажа [48]. По мнению канадских специалистов, внедрение транспортной системы на ЭДП на участке Торонто-Монреаль будет целесообразно по коммерческим соображениям не ранее 2010 года.

В Англии в середине 70-х годов была построена 150-кг модель транспортного средства с двумя СПОВ прямоугольной формы, движущаяся над 550-м направляющей [49]. В 80-х годах эксперименты были продолжены на обращенной вращающейся модели [50]. Конкретные данные о возможных областях применения разработок по проекту Вольфсона в литературе отсутствуют.

2.3. Выводы

Анализ разработок ЛЭМПЭ со СПОВ, выполненных за рубежом, показал:

1. Необходимость разработки ЛЭМПЭ со СПОВ возникла в конце 60-х годов в США в связи с созданием нового вида пассажирского транспорта - ВСНТ на магнитной подушке.

2. Период наиболее интенсивных исследований функциональных подсистем ЛЭМПЭ со СПОВ приходится на 70-е годы, когда к решению этой проблемы подключаются, за исключением Франции, практически все развитые капиталистические страны.

3. Наибольшие успехи в создании полномасштабных ЛЭМПЭ со СПОВ достигнуты в Японии, где на полигоне длиной 7 км транспортное средство массой 13 т достигло скорости 517 км/ч.

4. Области возможного применения ЛЭМПЭ со СПОВ не исчерпываются высокоскоростным наземным пассажирским транспортом. Самолетные катапульты, пусковые установки для ускорения ракет до первой космической скорости и заброски грузов непосредственно в космос, реактивные двигатели для орбитальных комплексов - далеко не полный перечень объектов потенциального внедрения ЛЭМПЭ со СПОВ.

5. Прототипом ТЛС ротора ОТС может служить ТЛС модели грузовой катапульты *Mass Driver*, построенная в начале 80-х годов группой Генри Колма из МТИ совместно с Принстонским университетом. Катапульта представляет собой устройство, предназначенное для ускорения в космосе грузов массой несколько тонн до скорости 1-10 км/с при помощи линейного синхронного двигателя. Наличие общих черт у модели *Mass Driver* и проекта ОТС (близость диаметра челнока модели и характерного размера поперечного сечения ротора, возможность создания вакуумного зазора между челноком и статором, отсутствие влияния крутильных колебаний ротора вокруг своей продольной оси симметрии на тяговые и левитационные характеристики, ориентированность на достижение высоких скоростей

подвижной части и т.д.) дает основания полагать, что ТЛС модели *Mass Driver Two* с небольшими изменениями конструкции якорных обмоток двигателя - продиктованными необходимостью обеспечения разъемности статора - может быть использована в проекте ОТС.

Судя по большому количеству ссылок, исчерпывающая информация о работах над первой и второй моделями грузовой катапульты содержится в изданиях:

а) *Progress in Astronautics and Aeronautics: Space-Based Manufacturing from Nonterrestrial Materials*. Progress Series vol. 57, series editor Martin Summerfield, volume editor G.K. O'Neil. Published in Dec. 1977 by AIAA, New York.

б) *Space Resources and Space Settlements*, NASA SP-428, 1979, U.S. Govt. Printing Office.

Ни в библиотеке им. В.И.Ленина, ни в ГПНТБ (г.Москва) этих изданий обнаружить не удалось.

Завершая обзор современного состояния развития линейных электро-механических преобразователей энергии со СПОВ, необходимо отметить, что существенный прогресс, достигнутый в разработке транспортных средств на электродинамическом подвесе, явился прямым следствием тех значительных усилий, которые предпринимались для совершенствования характеристик и конструкции СПОВ. Оценивая в целом положение дел в этой области, можно, тем не менее, заметить большой разрыв, который образовался между теоретическими разработками и практическими достижениями. Какие же причины этого явления? На наш взгляд, они коренятся в недостаточном развитии технологии изготовления сверхпроводящих магнитных систем. Имеющиеся на сегодняшний день транспортные катушки из Nb-Ti обладают МДС 700 кА, в то время как для использования наиболее экономичных - нульпоточных - устройств ЭДП требуются ОВ с МДС свыше 1 МА. Не вызывает сомнений, что эта цифра не предел даже для уже существующих материалов (например, Nb₃Sn) - ведь в физике высоких энергий используются куда как более мощные сверхпроводящие магниты. Впрочем, бурно развивающаяся технология высокотемпературных сверхпроводников обещает в корне изменить сложившиеся представления не только о возможностях СПОВ, но также о их роли в ЛЭМПЭ.

Что касается возможности использования в программе ОТС результатов выполнения программ по магнитной левитации, то они, на наш взгляд, заслуживают самого пристального внимания. Поезда на магнитной подушке - один из ближайших технических аналогов ОТС (другой аналог - кольцевые ускорители заряженных частиц), поэтому накопленный во всем мире опыт проектирования, изготовления и эксплуатации линейных электродвигателей и устройств электродинамической подвески со СПОВ должен стать отправной точкой для серьезных исследований по программе ОТС.

3. ВЫБОР СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДВЕСА РОТОРА ОБЩЕПЛАНЕТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

3.1. Поезда на магнитной подушке и ОТС: черты сходства и различия

Итак, что же общего между программой ОТС и магнитной левитацией экипажей высокоскоростного наземного транспорта в том виде, каком она известна сегодня? Являются ли эти задачи идентичными по своему содержанию и уровню возникающих проблем? И, наконец, в какой мере положительный опыт создания поездов на магнитной подушке может быть использован при разработке ТЛС ротора ОТС?

Чтобы ответить на эти непростые вопросы, необходимо, в первую очередь, разобраться в том, насколько различны цели, преследуемые при создании ВСНТ и ОТС, а также - в чем состоят препятствия на пути превращения их в коммерческие системы.

Как показали многолетние исследования ЯНЖД, высокоскоростной наземный транспорт на ЭДП вполне реализуем на современном уровне развития техники и технологии. По мнению его разработчиков [51], теперь нужно только время, чтобы склонить общественное мнение в пользу строительства новой транспортной системы. Кроме экологичности, этот вид транспорта по многим, включая экономические, показателям превосходит своего конкурента - авиацию, но для его окупаемости в нормативные сроки требуются огромные - даже по масштабам нашей страны - пассажиропотоки. Вторым фактором, существенно влияющим на окупаемость - средняя скорость движения, поскольку привлекательность данного вида транспорта для пассажира и, следовательно, его готовность уплатить дополнительную сумму за билет определяется реальным сокращением времени в пути. Чем выше будет средняя скорость, тем это сокращение будет заметнее.

Вместе с тем, следует учитывать, что с ростом скорости поезда происходит резкое увеличение силы аэродинамического торможения, на преодоление которой затрачивается основная часть мощности тя-

гового двигателя. При скорости 100-150 м/с - компромиссном значении для большинства проектов ВСНТ - сила магнитного торможения в системе подвеса составляет не более 20-30% от общей силы сопротивления движению, поэтому вопрос об абсолютной величине магнитных потерь не стоит слишком остро.

Совершенно иная ситуация складывается в ОТС. Поскольку движение ротора должно происходить в вакуумном канале статора, основной вклад в силу сопротивления движению будут давать именно магнитные потери в системе бесконтактного подвеса ротора. Во всем диапазоне скоростей двигатель должен не только компенсировать электродинамическую силу торможения, но и создавать избыточную силу тяги, преодолевающую силу инерции ротора. В этой связи становится совершенно очевидным, что вопрос о качестве системы подвеса, выражающемся в ее способности обеспечивать подвес ротора с минимальными потерями, становится центральным во всей проблеме. С учетом огромной линейной скорости ротора в конце цикла разгона для компенсации даже очень маленькой (с позиций ВСНТ) силы торможения потребуется значительная мощность. Удастся ли получить здесь более или менее удовлетворительные результаты, можно будет сказать, только проделав кропотливую теоретическую и экспериментальную работу.

Вторая проблема, привлекающая к себе внимание с первого взгляда, это надежность системы подвеса, определяющаяся ее конечной жесткостью. Во всех устройствах-аналогах - и американских, и японских - электродинамические системы бесконтактного подвеса и направления продублированы обыкновенными механическими. Например, на экипажах *MLU* (см. рис. 2.14) установлены направляющие колеса, в модели *Mass Driver Two* применяются материалы с низким коэффициентом трения. В ОТС же контакт ротора со статором при высоких скоростях недопустим, поэтому этот вопрос должен быть дополнительно проработан.

Далее, хотя ТЛС ротора ОТС может строиться по тем же принципам, что и ТЛС ВСНТ, в то же время, взаимодействие элементов ОТС должно быть организовано несколько отличным образом, чем в ВСНТ.

Действительно, в ВСНТ решается задача бесконтактного опирания экипажа при том, что на величину подвески H между днищем экипажа и полотном накладывается ограничение только "снизу":
 $H \geq 0,1$ м. Поскольку в диапазоне рабочих скоростей ВСНТ 0-150 м/с зависимость веса экипажа от скорости ничтожно слабая, то динамические изменения нагрузки на систему подвеса, возникающие под влиянием каких-либо случайных факторов (порывы ветра), компенсируются изменением высоты подвеса экипажа. Каковы бы ни были возмущения, экипаж занимает такое положение по отношению к полотну, при котором электродинамическая подъемная сила уравнивает статическую (вес экипажа) и динамическую компоненты нагрузки на систему подвеса. Заметим также, что типичный зазор между подвижной частью и статором в ВСНТ находятся в районе 100 мм, а линейная нагрузка на систему подвеса 10-20 кН/м.

В ОТС ставится цель бесконтактного удержания ротора при том, что его вес изменяется в очень широких пределах (от + 1 кН/м до - 600 Н/м). Естественно, что возможности перемещения ротора внутри статора - имеются ввиду смещения в поперечном сечении - весьма ограничены. В идеальном случае их не должно быть вообще, но тогда нарушается привычный механизм саморегулирования электродинамического подвеса. О возможности внешнего регулирования системы подвеса путем воздействия на какой-либо из ее параметров судить на сегодняшний день трудно, так как в такой постановке задача разработки УЭДП еще не решалась.

Таким образом, к электродинамической системе подвеса ротора ОТС предъявляются более высокие и напряженные требования, чем в ВСНТ. Если же говорить о проблемах создания тягового двигателя,

то и здесь следует подчеркнуть, что расширение диапазона рабочих скоростей в 60 раз (от 150 м/с до 10 км/с) не упрощает решение ни одной из них, а только усугубляет известные трудности. Имеется в виду следующее:

- необходимость увеличения напряжения на статорной обмотке двигателя для компенсации противо-ЭДС, зависящей от скорости вращения ротора по линейному закону;

- сложность отвода тепла от статорных обмоток (в ВСНТ секции обмотки нагружены током только в момент прохождения над ними поезда, в ОТС они должны работать непрерывно в течение нескольких недель) ;

- так называемая проблема больших полюсных делений.

Остановимся на последнем пункте подробнее.

Полюсное деление является одним из важнейших параметров всякого электрического двигателя. От того, насколько удачно выбрана его величина, зависит эффективность работы не только самой машины, но и связанных с ней устройств - источника питания, преобразователя и т.д. В ВСНТ на ЭДП индуктор из СПОВ имеет явнополюсную конструкцию, т.е. полюсное деление определяется практически длиной сверхпроводящей катушки. Самая длинная сверхпроводящая катушка для транспорта была изготовлена в Японии и имела длину 4 м, однако типичное значение длины транспортных СПОВ лежит в интервале между 1 и 2 м [52] .

Пусть двойное полюсное деление равно 4 м, тогда при скорости экипажа 100 м/с для питания якоря двигателя потребуется ток частотой $f = v/2\tau = 25$ Гц. Это характерное значение частоты тока, которое обеспечивает современные статические преобразователи частоты (СПЧ) . Допуская, что в ОТС максимальная частота может быть повышена до 50 Гц (дальнейшее ее увеличение приведет к неоправданному усложнению СПЧ и росту дополнительных потерь в двигателе) , получаем, что полюсное деление тягового двигателя ОТС долж-

но быть 100 м. Трудно представить себе магнит такой длины, хотя в большей степени эту проблему можно отнести к разряду технологических, а не технических.

3.2. "Идеальный" цикл разгона ротора ОТС

Рассмотрим работу идеальной ТЛС ротора ОТС. Под идеальной будем подразумевать такую систему, в которой цикл разгона и вывода ротора в верхние слои атмосферы (до отделения от него вакуумной оболочки) организован с минимальными энергозатратами. Имеется в виду следующее. Основным потребителем энергии в ТЛС является тяговый двигатель, который в процессе раскручивания ротора преодолевает не только силу инерции, но также силы магнитного трения. Наличие последних обусловлено потерями от вихревых токов, наводимых в электропроводящих элементах конструкции ТЛС под воздействием переменных магнитных полей ротора и статора. Не отрицая необходимости протекания вихревых токов на определенных этапах рабочего цикла разгона - ведь именно за счет взаимодействия СПОВ с вихревыми токами во вторичном элементе должно осуществляться электродинамическое подвешивание ротора относительно статора - считаем, что основным требованием, определяющим структуру ТЛС, должна стать минимизация потерь от вихревых токов в системах магнитного подвеса ротора и конструктивных элементах двигателя на всех этапах рабочего цикла.

На наш взгляд, рабочий цикл разгона ротора целесообразно разбить на 4 этапа.

Первый этап характеризуется изменением скорости ротора от нуля до значения V_1 (приблизительно 100 м/с), когда электродинамическая сила подъема незначительна, зато сила торможения в системе подвеса достигает своего пикового значения. Поэтому на первом этапе подвеска ротора должна осуществляться либо вспомогательной системой, либо самим тяговым двигателем. При таких скоростях управление двигателем не представляет большой сложности.

Второй этап включает диапазон изменения скорости ротора от V_1 до $V_2 = 8$ км/с - скорости, при которой ротор становится невесомым. Здесь уже работает основная система подвеса - электродинамическая, а ТД переводится в режим создания максимального тягового усилия.

При переходе через точку V_2 (третий этап) ротор начинает оказывать давление на периферийную часть статора. Электродинамическое усилие левитации должно изменить свое направление на противоположное. При максимальной скорости ротора (10 км/с) оно составит порядка 0,6 веса неподвижного ротора.

Четвертый этап охватывает промежуток времени между выключением тягового двигателя до момента освобождения ротора от вакуумной оболочки на высоте 100 км. Во время подъема ротора зазор между ним и вакуумным кожухом поддерживается за счет автономной системы электродинамического подвеса.

Диаграммы, поясняющие различные варианты последовательности работы тягового двигателя (ТД), стационарной системы подвеса ротора и автономной системы подвеса вакуумной оболочки (СПВО) показаны на рис. 3.1.

Во всех вариантах ТД работает на протяжении первых трех этапов. Важно, чтобы к моменту механического раскрытия статора и началу подъема ротора обмотка статора была обесточена. В противном случае якорный ток будет увеличиваться до недопустимых пределов.

В базовом варианте ТЛС [1], когда подвес ротора осуществляется за счет взаимодействия протекающих в нем вихревых токов с постоянным полем статора, диссипация энергии будет происходить в нем на протяжении всего цикла разгона. Особенно заметные потери будут наблюдаться на первом и втором этапах, когда сила магнитного торможения проходит через пик и остается на значительном уровне. Это может привести к сильному разогреву ротора. Положение усугубляется тем, что в принятой конструкции отвод тепла от ротора затруднен:

этап система	Базовый вариант				Вариант 2			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
ТД	—————				—————			
СПР	—————				—————			
СПВО	—————				—————			

этап система	Вариант 3				Вариант 4			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
ТД	—————				—————			
СПР		—————						
СПВО			—————			—————		

Рис. 3.1.

Диаграммы вариантов работы систем ОТС

ТД - тяговый двигатель; СПР - система подвеса ротора;
СПВО - система подвеса вакуумной оболочки.

- наличие вакуумного промежутка между ротором и оболочкой делает невозможным конвективный теплообмен посредством атмосферного воздуха; - в связи с разогревом статорных обмоток теплообмен излучением также малоэффективен.

Увеличение температуры ротора как вторичного элемента системы ЭДП крайне нежелательно по следующим соображениям. Какой бы мы ни выбрали материал проводника для ротора, его сопротивление с ростом температуры также будет увеличиваться. Это, в свою очередь, приведет к увеличению потерь в системе магнитного подвеса, проявляющихся в виде тормозной силы. Для преодоления ее потребуется увеличение мощности двигателя. В итоге тепловыделения в роторе еще более возрастут, его температура дополнительно увеличится и т.д.

Проблема эффективного охлаждения обмоток является одним из тех барьеров, которые ограничивают возможности создания электрических машин предельной мощности. Поскольку одним из определяющих признаков ОТС является наличие вакуумного зазора между ротором и статором, препятствующего отводу тепла от ротора, мы неизбежно приходим к выводу, что при выборе компоновочной схемы ТЛС предпочтение должно быть отдано такому варианту, в котором тепло к ротору не подводилось бы совсем. Тепло, выделяющееся под действием вихревых токов, должно не концентрироваться в одном конструктивном элементе ТЛС - роторе, а наоборот, распределяться по возможности в тяговой и подвесной системах статора. Поскольку охлаждение статорных обмоток может быть только естественное, поверхность теплообмена катушек с окружающей средой должна быть достаточно развитой.

В таблице 3.1. дана сравнительная характеристика классического и обращенного вариантов компоновки ТЛС. Классическая компоновка, принятая в ВСНТ, предполагает размещение СПОВ на подвижной части устройства. В обращенном варианте источник магнитного поля возбуждения расположен на статоре, а вторичным элементом электродинамической системы подвеса является сам ротор ОТС, выполненный из электропроводящего материала.

Сравнительная характеристика вариантов компоновки ТЛС

Таблица 3.1.

Проблема	Классическая схема с подвижным индуктором (СПОВ на роторе)	Обращенная схема с источником магнитного поля на статоре
Преодоление пика силы торможения в системе подвеса при низких скоростях	отключение системы подвеса в этом диапазоне скоростей путем размыкания короткозамкнутых статорных катушек	необходимость увеличения мощности тягового двигателя для разгона ротора до скорости 100 м/с из-за потерь в роторе от вихревых токов
Запитка ротора в процессе разгона	не требуется, так как ОВ запитываются предварительно, до пуска двигателя	индуктивная запитка
Скин-эффект во вторичном элементе системы подвеса	несущественный, благодаря тому, что статорные обмотки намотаны из тонкого проводника	ухудшение тяговых и подвесных характеристик под влиянием вытеснения наведенного вихревого тока в поверхностный слой ротора
Отвод тепла от ротора	не требуется, так как отсутствует его разогрев	затруднен, так как этому препятствует вакуумный зазор между ротором и статором

Как видно из таблицы 3.1, не только охлаждение обмоток, но также целый ряд других проблем, связанных с обеспечением работоспособности ТЛС, значительно проще решаются при классической компоновочной схеме с дискретными статорными катушками. Доступность неподвижно расположенных контуров, легкость согласованного управления ими по командам процессора (подключение - отключение к фидерной линии, замыкание катушек накоротко) расширяют возможности варьирования структуры ТЛС непосредственно в процессе разгона ротора.

Второй и последующие варианты диаграмм рисунка 3.1 относятся именно к классической конструкции ТЛС.

По второму варианту предполагается, что подвес ротора на II и III этапах цикла осуществляется посредством стационарной системы, жестко связанной со статором, а вторичная система включается в работу только на этапе IV.

Предпочтение здесь должно быть отдано нульпоточным устройствам ЭДП с дискретными якорными катушками. Как уже указывалось ранее, они способны реверсировать нормальное усилие подвеса в зависимости от смещения ОВ относительно петель якорной катушки. Другое их преимущество, которое можно использовать в системе подвеса вакуумной оболочки, связано с наличием "мертвой" точки на рабочей характеристике, когда ОВ располагается в срединной плоскости между петлями. Конкретно для ТЛС это значит, что если расположить ротор строго по центру вакуумного кожуха (на этапах II и III), то магнитной связи между ОВ и короткозамкнутыми катушками кожуха не будет.

На этапе IV ротор, расширяясь, смещается из центрального положения - только с этого момента вторичная система подвеса начинает работать. До этого (этап II и III) вихревые токи в кожухе не наводятся и потерь энергии нет.

Вариант 3 предусматривает использование нормальнопоточных устройств для подвески ротора относительно стационарной системы на этапе II и вакуумной оболочки на этапах III и IV разгона. Включение и выключение соответствующих систем подвеса производится посредством замыкания накоротко и размыкания концов нормальнопоточных контуров подвеса, расположенных на статоре устройства и вакуумном кожухе ротора. На этапе II катушки подвеса на кожухе разомкнуты, силового взаимодействия между ними и ротором нет. Подвеска ротора осуществляется за счет взаимодействия со статорными катушками, в это время короткозамкнутыми. При переходе через скорость V_2 статорные катушки размыкаются, а расположенные на кожухе закорачиваются. Ротор оказывает магнитное давление на кожух, но последний удерживается от перемещения механическими захватами. При достижении скорости 10 км/с захваты раскрываются и ротор, расширяясь, принуждает расширяться и вакуумный кожух.

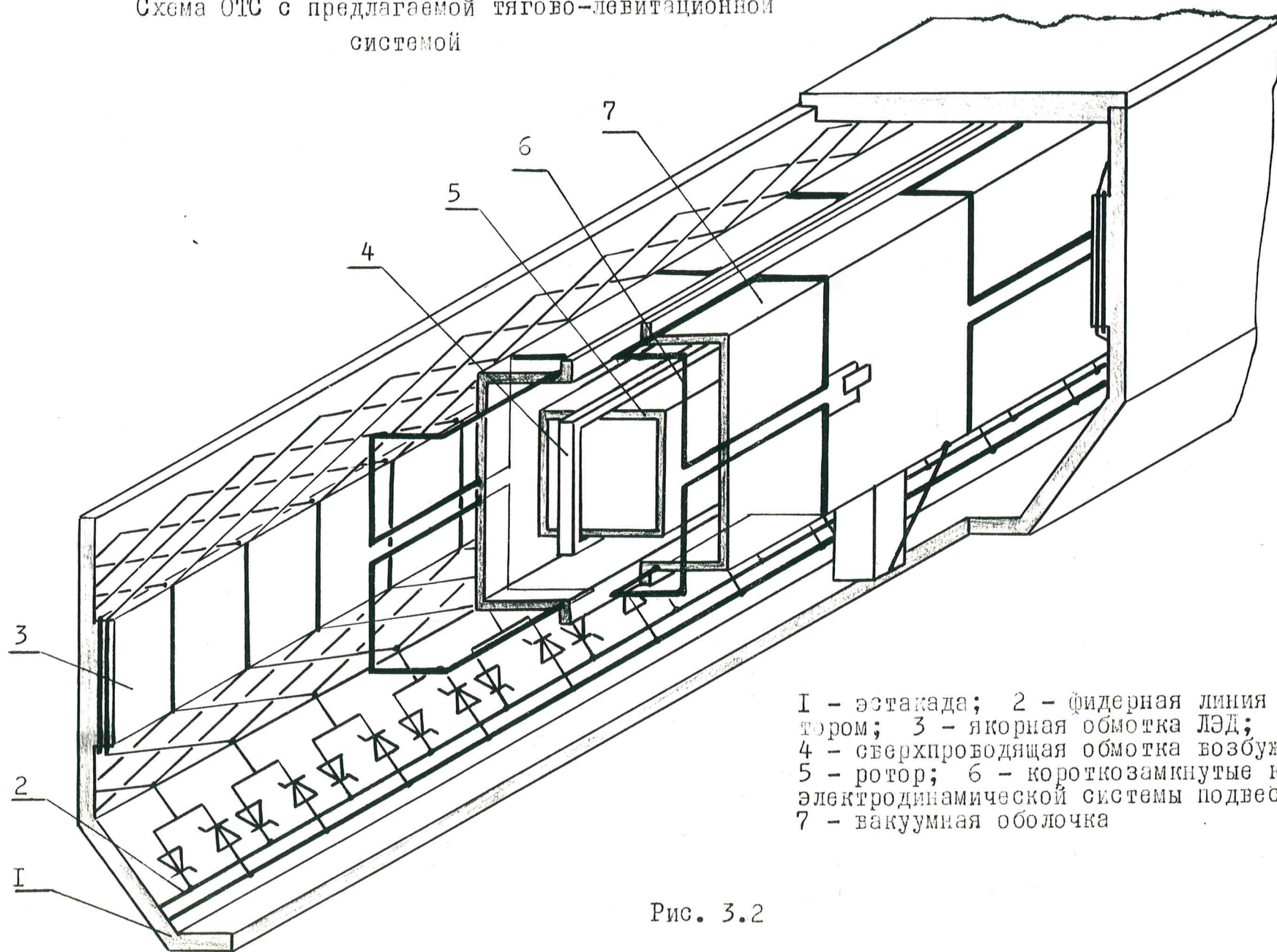
Вариант 4 диаграммы поясняет работу ТЛС, в которой подвес ротора на этапах II, III и IV обеспечивается относительно короткозамкнутых нульпоточных катушек вакуумного кожуха, а обмотки, расположенные на статоре, используются только для привода ротора.

Таким образом, для уменьшения потерь энергии при разгоне ротора ОТС следует предусмотреть такое схемное решение ТЛС, которое допускало бы раздельную работу и автономное управление тяговым двигателем и системами подвеса. Необходимым условием выполнения этого требования является размещение сверхпроводящих обмоток возбуждения на роторе и дискретных катушек подвеса на статорной части ОТС.

3.3. Схема предлагаемой тягово-левитационной системы для ОТС

Компановочная схема ОТС с предлагаемой ТЛС представлена на рисунке 3.2. Главное ее отличие от базовой схемы состоит в использовании сверхпроводящих обмоток возбуждения, установленных вертикально на роторе в его диаметральной плоскости, и дискретных контуров в качестве вторичного элемента электродинамической системы

Схема ОТС с предлагаемой тягово-левитационной системой



- I - эстакада; 2 - фидерная линия с коммутатором; 3 - якорная обмотка ЛЭД;
 4 - сверхпроводящая обмотка возбуждения;
 5 - ротор; 6 - короткозамкнутые катушки электродинамической системы подвеса;
 7 - вакуумная оболочка

Рис. 3.2

подвеса. СПОВ имеют удлиненную форму, близкую к прямоугольной, и расположены по длине ротора цепочкой - одна за другой.

Дискретные короткозамкнутые катушки электродинамической системы подвеса смонтированы на вакуумной оболочке ротора. В отличие от СПОВ, катушки образуют два ряда, сдвинутых друг относительно друга в направлении движения ротора на половину шага намотки катушек.

Каждая катушка состоит, в свою очередь, из двух петель углового профиля, расположенных в вертикальной плоскости одна над другой. Верхний и нижний продольные проводники каждой катушки отогнуты в сторону ротора и находятся в плоскости СПОВ.

Статорные обмотки двухстороннего линейного электродвигателя постоянного тока расположены еще дальше от СПОВ и закреплены на обеих вертикальных стенках эстакады. Обмотка имеет катушечную конструкцию. Подключение ее секций к фидерной линии производится посредством полупроводникового коммутатора, ключевые элементы которого равномерно распределены вдоль эстакады.

Работает ТЛС следующим образом.

До пуска двигателя выполняют подготовительные операции:

- запитывают постоянным током СПОВ;
- для уменьшения потерь при разгоне ротора в диапазоне низких скоростей, когда сила торможения в системе магнитного подвеса достигает своего пика, размыкают катушки подвеса.

Подают напряжение на статорную обмотку ЛЭД. Под действием электромагнитной силы тяги ротор приходит в движение. При достижении им скорости порядка 100-200 м/с катушки подвеса замыкают коротко. Под влиянием переменного магнитного поля движущихся СПОВ в них наводятся вихревые токи, величина которых уже достаточна для того, чтобы осуществлять в дальнейшем подвеску ротора относительно вакуумной оболочки.

Особенностью предлагаемой системы электродинамического под-

веса является то, что она способна самостоятельно обеспечивать бесконтактное взаимодействие ротора с вакуумной оболочкой на всех этапах процесса разгона:

- при скоростях ниже 8 км/с, когда ротор обладает "положительным" весом, взаимодействие СПОВ с короткозамкнутыми катушками носит характер отталкивания от нижних петель катушки и одновременно притяжения к верхним;

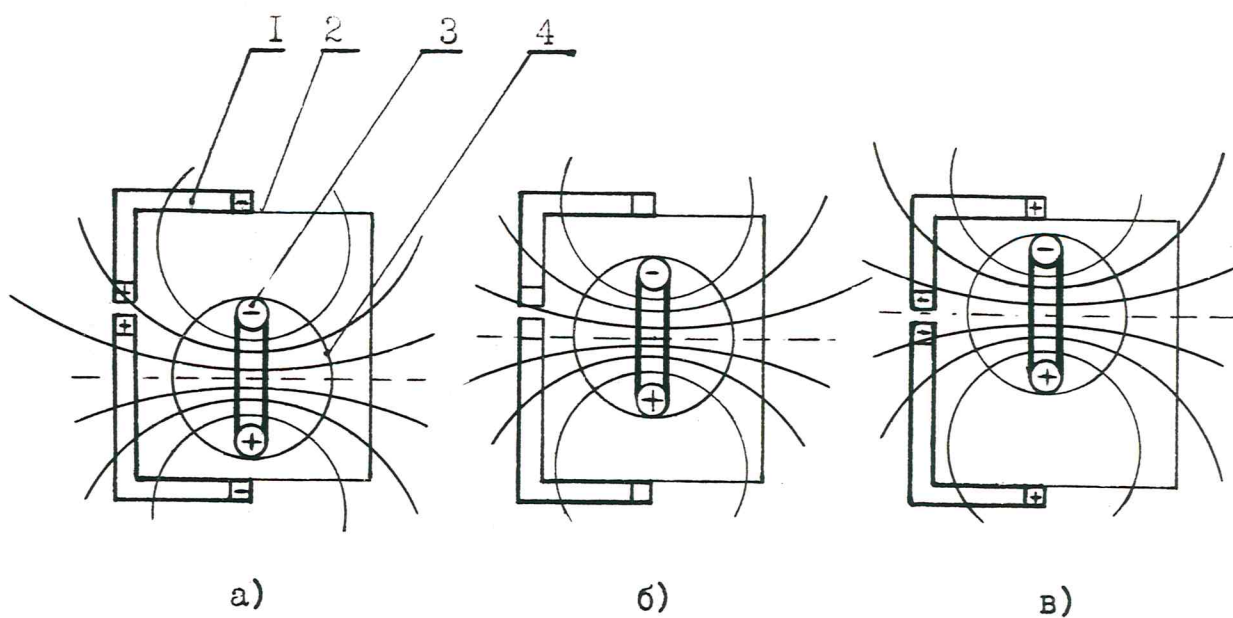
- при скоростях выше 8 км/с ротор оказывает давление на периферийную часть оболочки, поэтому сила подвеса действует в противоположном направлении: СПОВ отталкиваются от верхних и притягиваются к нижним петлям катушек;

- при достижении скорости 10 км/с освобождаются захваты, удерживающие оболочку ротора от перемещения; ротор, расширяясь, принуждает двигаться и оболочку. На этом этапе осуществляется подвеска оболочки относительно ротора.

Такая многофункциональность автономной системы подвеса обеспечивается за счет специальной конфигурации короткозамкнутых катушек. Если говорить об особенностях ее работы подробнее, то следует отметить, что по мере увеличения скорости положение ротора относительно вакуумной оболочки будет изменяться.

Дело в том, что величина и направление действия электродинамического усилия подвеса определяются только положением ротора относительно короткозамкнутых катушек оболочки. Пусть в начале разгона ротор находится в точке, показанной на позиции а рис.3.3. Магнитный поток, связывающий обмотку возбуждения ротора с произвольной якорной катушкой, определяется разностью потоков, пронизывающих верхнюю и нижнюю петли катушки. В данном случае часть потока, создаваемого ОВ и связанная с нижней петлей, превышает часть, связанную с верхней петлей. Поскольку ОВ движется, результирующий поток через катушку изменяется во времени. В катушке наводится ЭДС и вихревой ток. Направление протекания тока таково,

Положение ротора в поперечном сечении ОТС
при различных скоростях



1 - катушка подвеса; 2 - вакуумированная оболочка;
3 - СПОВ; 4 - ротор

Рис. 3.3

что СПОВ отталкиваются от нижнего ряда петель и притягиваются к верхнему ряду. Будем считать, что в указанном на поз. а положении ротора сила подвеса компенсирует начальный вес ротора.

По мере увеличения скорости ротора его вес уменьшается. Под действием возникающей при этом разности сил ротор смещается вверх. Потокосцепление ОВ с нижней петлей уменьшается, а с верхней увеличивается. Происходит компенсация ЭДС, наводящихся в петлях, поэтому вихревой ток в катушке уменьшается. Очевидно, что при любой скорости ротора всегда найдется такая точка, характеризующая его смещение в плоскости поперечного сечения ОТС, в которой подъемное электродинамическое усилие равно весу ротора.

При скорости 8 км/с, когда ротор становится невесомым, он находится в центре оболочки (поз. б рисунка 3.3). Его положение соответствует полной компенсации потоков, пронизывающих верхнюю и нижнюю петли контура, в связи с чем магнитная связь между ОВ и катушками подвеса отсутствует.

В диапазоне скоростей 8-10 км/с ротор смещается к верхнему ряду петель (рисунок 3.3, поз. в). Дисбаланс потоков, связанных с верхней и нижней петлями катушки, имеет теперь противоположный знак, а ЭДС и вихревой ток в катушке направлены таким образом, что ротор отталкивается от верхних и притягивается к нижним петлям.

Таким образом, во всем диапазоне скоростей ЭДУ подвеса возвращают ротор в центральное по отношению к вакуумной оболочке положение.

3.4. Выводы

1. В качестве главного критерия при выборе структуры системы ЭДП должен стать минимум потерь мощности во вторичном элементе на всех этапах цикла разгона.

2. Схемное решение ТЛС должно допускать отдельную работу и автономное управление тяговым двигателем и системой подвеса. Необходимым условием выполнения этого требования является размещение СПОВ на роторе, а дискретных катушек тяги и подвеса - на статоре и вакуумной оболочке ротора.

3. В качестве источника магнитного поля возбуждения ЛЭД и системы подвеса целесообразно использовать одни и те же СПОВ.

4. Наиболее перспективной, на наш взгляд, является система ЭДП, в которой вторичный элемент выполнен в виде двухпетлевых короткозамкнутых катушек, установленных на вакуумной оболочке ротора и образующих совместно со СПОВ нульпоточную систему. В процессе разгона ротора эта система обеспечивает бесконтактное удержание ротора относительно вакуумной оболочки, а на этапе подъема ротора - подвеску оболочки относительно расширяющегося ротора.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДВЕСА РОТОРА ОТС

Магнитная левитация высокоскоростных наземных транспортных средств, как модное течение международной технической мысли 70-80 гг., оставила после себя богатое литературное наследие в виде огромного количества книг, журнальных статей, патентов, трудов конференций и т.п. Обратившись к нему, мы с большой пользой для себя можем почерпнуть самую разнообразную информацию: о разработанных на уровне идей конструкциях ЛЭД и УЭДП, о методах их математического моделирования, о проектах новых транспортных систем, возведенных в ранг национальных программ, об экспериментальных исследованиях лабораторных и натурных образцов и прочее, и прочее, и прочее. Вместе с тем, нельзя не согласиться с автором [53] в том, что "несмотря на множество публикаций и изобилие технических показателей, в литературе отсутствуют какие-либо оптимизационные обоснования, экономические данные таких систем".

Действительно, пытаясь разобраться в логике событий, в судьбе конкретных научных концепций, не всегда удается точно установить для себя, что привело к краху одних программ и благодаря чему другие продолжают развиваться и сегодня вполне успешно. По-видимому, истинные причины "крутых поворотов" не всегда укладываются в рамки понятий технической или экономической нецелесообразности, однако, не вызывает сомнений и то, что те программы, которые удастся завершить, оправдают себя. "... претерпевший же до конца спасется."

Выражаясь формальным языком, разработка высокоскоростной ТЛС представляет собой многокритериальную задачу многомерной оптимизации. Решаема ли она на сегодняшний день в полном объеме? Представляется, что нет. И дело здесь не в отсутствии соответствующих математических методов, а в недостаточной корректности критериев и самой постановки задачи, в сложности формализации всех параметрических и функциональных ограничений, которые накладываются на объект исследования. Замена научно обоснованного выбора параметров устройства

интуитивными решениями является сегодня весьма широко практикуемым приемом. Впрочем, вряд ли можно ставить это кому-либо в вину, ведь интуитивное принятие правильного решения составляет неотъемлемый элемент всякого технического творчества, хотя и относится, если угодно, к области искусства.

Несколько лучшее положение сложилось в отношении задачи анализа, когда требуется определить характеристики заданной конструкции. За 20 лет, прошедшие с момента изобретения электродинамического подвеса, было развито несколько подходов к ее решению, отличающихся между собой как степенью сложности исходной математической модели, так и применяемым математическим аппаратом. Большой вклад в расчетно-теоретические исследования ЭДП внесли отечественные ученые [54], [55]. Особенно сложные расчеты были выполнены ими по УЭДП с листовой вторичной частью [56], [57]. Однако приоритет в исследовании дискретных путевых структур принадлежит все-таки японским авторам [58], [59], [60]. Естественно, что накопленный и здесь опыт может пригодиться при исследовании ТЛС ротора ОТС.

Настоящая глава посвящена анализу электродинамических усилий подвеса и торможения в предложенной системе ЭДП ротора ОТС. Целью расчета является исследование электромагнитных связей в системе подвеса, скоростной характеристики, а также реакций электродинамических усилий на смещения ротора ОТС в поперечной направлению движения плоскости.

4.1. Показатели качества и рабочие характеристики систем электродинамического подвеса

Одной из особенностей функционирования устройств ЭДП является необходимость принудительного взаимного перемещения первичного и вторичного элементов для возникновения усилия, поддерживающего состояние левитации. В этом смысле - с точки зрения вида входного и полезного выходного воздействий - УЭДП можно рассматривать как

преобразователь горизонтального тягового усилия двигателя в нормальное к направлению движения экипажа усилие, осуществляющее его боковое направление и подвес. Для количественной оценки качества такого преобразования существует безразмерный критерий - левитационное качество γ , численно равное отношению средней силы подъема к средней силе торможения, возникающих в УЭДП при данной скорости V :

$$\gamma = \int_0^T F_L dt / \int_0^T F_d dt, \quad (4.1)$$

где T - период колебаний сил.

С позиций же энергетического подхода УЭДП представляет собой механоэлектрический преобразователь, в котором электрофизические процессы протекают подобно процессам в многофазном синхронном генераторе, работающем в режиме короткого замыкания.

Действительно, при движении индуктора вся энергия, передаваемая от него к статору индуктивным путем, рассеивается в проводниках вторичного элемента в виде джоулевых потерь. Эта энергия подводится к индуктору извне как механическая, затрачиваемая на преодоление силы торможения, обусловленной взаимодействием индуктора с полем вихревых токов. Сила подвеса, которая образует с вектором скорости прямой угол, работы не совершает.

Таким образом, для оценки УЭДП как потребителя энергии служит такой критерий, как потери мощности во вторичном элементе, приведенные на единицу массы подвешиваемого тела. Эту мощность необходимо отводить от вторичного элемента, чтобы его температура не увеличивалась:

$$P_{yg} = \frac{\sum \bar{I}_g^2 R}{M} = \frac{F_d \cdot V \cdot g}{F_L} = \frac{V \cdot g}{\gamma} \quad (4.2)$$

Как видно, выражения (4.1) и (4.2) суть одно и то же, хотя по определению различны.

Следующий показатель - жесткость системы подвеса, численно равная производной от электродинамического подъемного усилия по величине рабочего зазора

$$K = \partial F_z / \partial H. \quad (4.3)$$

Она оказывает влияние главным образом на продолжительность затухания свободных колебаний экипажа, возникающих под воздействием случайных возмущающих факторов. Одно время высказывались опасения, что в некотором диапазоне скоростей электродинамическая система не сможет обеспечить стабильный подвес, т.е. малейшее вертикальное возмущение экипажа будет усиливаться и приведет к его раскачиванию.

В качестве предохранительной меры предлагалось устанавливать на экипаже ниже СПОВ демпфирующие короткозамкнутые катушки из меди [61]. Другая идея - использовать для демпфирования колебаний в системе подвеса нормальные усилия, развиваемые линейным двигателем, - была реализована в макете *Magnetrane*, построенном в МТИ.

Для полноты представлений о возможностях той или иной электродинамической системы подвеса рассчитывают скоростные характеристики - зависимости подъемного и тормозного усилий от скорости. Практически ценная информация, которую можно извлечь из этих характеристик, исчерпывается знанием:

- максимального значения силы торможения, которое необходимо преодолеть двигателю для успешного разгона экипажа, и скорости, при которой оно достигается $v^* = \arg \max F_d(v)$;
- сил подъема и торможения при крейсерской скорости;
- пороговой скорости, выше которой сила подъема превышает вес экипажа.

При исследовании ЭДП ВСНТ скоростные характеристики строят обыкновенно при условии $H = \text{const}$. По-видимому, для ОТС такой

подход не корректен, так как с ростом скорости вес ротора будет уменьшаться и он будет перемещаться, так что будет изменяться и зазор. Поправка к величине зазора должна учитываться на всех этапах разгона.

4.2. Исследование магнитных связей между обмотками возбуждения и якорными контурами - основа расчета силовых и энергетических характеристик системы подвеса

Анализ, как первая ступень в исследовании явления, процесса или, как в нашем случае, объекта (устройства), предполагает наличие возможности отдельного, обособленного изучения его различных сторон, выделения из всей совокупности связей устройства наиболее важных и значимых с точки зрения необходимости выполнения им заданных функций. Если говорить более конкретно - о рабочих процессах в устройстве электродинамической подвески, то следует учитывать, что они являются продуктом совокупного влияния двух факторов - собственно конструкции, понимаемой в чисто геометрическом аспекте, и режимов эксплуатации, характеризующихся, прежде всего, скоростью движения подвижной части и условиями охлаждения обмотки якоря. К счастью, в достаточно широком диапазоне высоких скоростей влияние скорости на левитационные показатели носит довольно-таки простой характер, в связи с чем появляется возможность выявления зависимости левитационных показателей от конструктивных параметров устройства в "чистом" виде.

Для вычисления подъемного усилия, действующего на одну СПОВ, воспользуемся энергетическим подходом (см. раздел 1.2.3.2.) :

$$F_L = \sum_{n=1}^n F_{Ln} = \sum_{n=1}^n I_s \cdot I_{jn} \frac{\partial M_{sjn}}{\partial z}, \quad (4.4.)$$

где n - количество путей контуров, взаимодействующих со СПОВ в данный момент времени.

При дискретной структуре вторичного элемента системы подвеса мгновенное значение силы пульсирует во времени с периодом $T = \frac{2\pi}{V}$,

поэтому, чтобы найти ее среднее значение, необходимо взять интеграл вида

$$\hat{F}_L = \frac{1}{T} \int_0^T F_L dt = \frac{1}{T} \sum_n \int_0^T \bar{I}_s \cdot \bar{I}_n \cdot \frac{\partial M_{sgn}}{\partial z} dt. \quad (4.5)$$

Если пренебречь влиянием вихревых токов друг на друга и на МДС СПОВ, т.е. полагать, что $\bar{I}_s = const$, а также считать, что СПОВ движется над статором с постоянной скоростью V и при этом зазор между ними не изменяется, то (4.5) можно преобразовать следующим образом:

$$\hat{F}_L = \frac{\bar{I}_s}{T} \left(\dots \int_0^T \bar{I}_{g_{-1}} \frac{\partial M_{sg_{-1}}}{\partial z} dt + \int_0^T \bar{I}_{g_0} \frac{\partial M_{sg_0}}{\partial z} dt + \int_0^T \bar{I}_{g_1} \frac{\partial M_{sg_1}}{\partial z} dt + \dots \right) \quad (4.6)$$

Здесь индекс $n = 0$ относится к контуру, над которым находится центр СПОВ, $n = -1$ - к контуру, стоящему слева от центрального, $n = 1$ - справа. Считаем, что СПОВ движется слева направо.

Очевидно, что вихревые токи в любых двух соседних контурах будут отличаться друг от друга только фазовым сдвигом:

$$\bar{I}_{g_{n-1}}(t) = \bar{I}_{g_n}(t+T) = \bar{I}_{g_{n+1}}(t+2T) \dots \quad (4.7)$$

С учетом этого получим

$$\hat{F}_L = \frac{\bar{I}_s}{T} \left(\dots \int_0^T \bar{I}_{g_0}(t+T) \frac{\partial M_{sg_0}(t+T)}{\partial z} dt + \int_0^T \bar{I}_{g_0}(t) \frac{\partial M_{sg_0}(t)}{\partial z} dt + \int_0^T \bar{I}_{g_0}(t-T) \frac{\partial M_{sg_0}(t-T)}{\partial z} dt + \dots \right)$$

Произведем замену переменных в крайних интегралах: $t_1 = t+T$, $t_2 = t-T$.

$$\begin{aligned} \hat{F}_L &= \frac{\bar{I}_s}{T} \left(\dots \int_T^{2T} \bar{I}_{g_0}(t_1) \frac{\partial M_{sg_0}(t_1)}{\partial z} dt_1 + \int_0^T \bar{I}_{g_0}(t_1) \frac{\partial M_{sg_0}(t_1)}{\partial z} dt + \right. \\ &+ \int_{-T}^0 \bar{I}_{g_0}(t_2) \frac{\partial M_{sg_0}(t_2)}{\partial z} dt_2 + \dots \left. \right) = \frac{\bar{I}_s}{T} \left(\dots \int_{-T}^0 \bar{I}_{g_0} \frac{\partial M_{sg_0}}{\partial z} dt + \right. \\ &+ \int_0^T \bar{I}_{g_0} \frac{\partial M_{sg_0}}{\partial z} dt + \int_T^{2T} \bar{I}_{g_0} \frac{\partial M_{sg_0}}{\partial z} dt + \dots \left. \right) = \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$= \frac{I_s}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{I}_g \cdot \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} dt \stackrel{t = \frac{x}{v}}{=} \frac{I_s}{\tau_g} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{I}_g(x) \frac{\partial M_{sg}}{\partial z}(x) dx$$

Таким образом, как видно из (4.8), вычисление средней силы подъема, действующей на СПОВ со стороны цепочки якорных контуров системы подвеса, сводится к определению площади под кривой произведения вихревого тока в одном из контуров на производную от коэффициента взаимоиנדукции между СПОВ и этим же контуром.

Выражение (4.8) еще более упростится, если мы перейдем к высокоскоростному пределу, когда проявляется идеальный диамагнетизм якорных контуров. Имеется в виду случай, когда вихревой ток в короткозамкнутом контуре ведет себя таким образом, что внешнее магнитное поле не проникает в него, т.е. наблюдается полное экранирование:

$$\bar{I}_g(x) = - \frac{I_s \cdot M_{sg}(x)}{L_g}$$

Подставляя эту зависимость в (4.8) и вводя множитель $1/\tau_s$, получим среднюю силу подъема, действующую на единицу длины ротора

$$\hat{F}_z = - \frac{I_s^2}{L_g \tau_s \tau_g} \int_{-\infty}^{\infty} M_{sg} \cdot \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} dx = - \frac{2 I_s^2}{L_g \tau_s \tau_g} \int_0^{\infty} M_{sg} \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} dx \quad (4.9)$$

Присмотревшись к (4.9) внимательнее, можно заметить, что в него входят переменные, которые сами определяются только конструктивными параметрами устройства (МДС и геометрией СПОВ, размерами якорных контуров и их взаимным положением) и не зависят от того, что мы называли режимами эксплуатации. Действительно, τ_s и τ_g - полюсные деления обмотки возбуждения и якоря соответственно; L_g - собственная индуктивность якорного контура, которая полностью определяется его геометрией и не зависит ни от материала проводника, ни от его температуры и т.п.; M_{sg} - коэффициент взаимоиנדукции

между СПОВ и якорным контуром - также является функцией только геометрических размеров якорного контура и СПОВ, а также их взаимного положения.

Найдем, как влияют эти же параметры на величину джоулевых потерь во вторичном элементе в расчете на единицу длины ротора. Количество тепла, выделяющееся в одном из контуров подвеса при прохождении над ним одного полюса индуктора, найдем интегрированием:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} I_g^2 R_g dt \stackrel{x=vt}{=} \frac{I_s^2 R_g}{L_g^2} \int_{-\infty}^{\infty} M_{sg}^2 \frac{dx}{V} = \frac{2I_s^2 R_g}{L_g^2 V} \int_0^{\infty} M_{sg}^2 dx \quad (4.10)$$

За одну секунду над контуром пройдет $\frac{V}{\tau_s}$ полюсов, следовательно, в нем выделится $Q \cdot \frac{V}{\tau_s}$ тепла. Наконец, с учетом того, что шаг намотки контуров может отличаться от одного метра, получим

$$P_g = \frac{Q \cdot V}{\tau_s \cdot \tau_g} = \frac{2I_s^2 \cdot R_g}{L_g^2 \cdot \tau_s \cdot \tau_g} \int_0^{\infty} M_{sg}^2 dx \quad (4.11)$$

Как видно, величина отношения мощности, диссипируемой на единице длины ротора, к величине среднего подъемного усилия не зависит ни от МДС СПОВ, ни от их полюсного деления или шага намотки контуров и является функцией только геометрических размеров СПОВ и якорного контура, а также их взаимного положения:

$$P_{yg}^* = \frac{R_g}{L_g} \frac{\int_0^{\infty} M_{sg}^2 dx}{\int_0^{\infty} M_{sg} \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} dx} \quad (4.12)$$

По своему физическому смыслу коэффициенты собственной и взаимной индукции характеризуют способность катушки заданной геометрии создавать магнитный поток, сцепленный либо с ней самой, либо с другим контуром. Справочный материал по расчету коэффициента самоиндукции катушек различных пространственных конфигураций

приведен в [62], там же сформулированы подход и приемы расчета коэффициента взаимной индукции.

Поскольку вычисление коэффициентов взаимной индукции представляет интерес не только при рассмотрении работы УЭДП, но также и ЛЭД, остановимся на этом вопросе подробнее.

Зачастую при расчете взаимной индукции принимают, что СПОВ имеют прямоугольную форму, т.е. пренебрегают наличием скруглений в углах обмотки. Аналогичным образом поступают и с якорными контурами. В результате в качестве расчетной модели получают два контура, образованных из взаимно параллельных и перпендикулярных отрезков проводников. Переходя от простого к сложному, рассмотрим три модели. Первая модель - взаимно параллельные прямоугольные контура (рис.4.1.), вторая - взаимно перпендикулярные прямоугольные контура (рис.4.2.), и наконец, третья модель - прямоугольный плоский контур СПОВ взаимодействует с трехмерным контуром предложенной для ОТС конфигурации (рис. 4.3) .

Итак, первая расчетная модель. Положение каждого контура условимся определять по координатам его геометрического центра. Пусть один из контуров с вершинами в точках А, В, С, D и размерами сторон $2a \times 2b$ находится в начале системы координат, а другой - PRST - с размерами сторон $2c \times 2d$ - в произвольной точке N₀ с координатами x_0, y_0, z_0 .

Тогда согласно [62] взаимная индуктивность между контурами может быть найдена из выражения

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2}{r} , \quad (4.13)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м, l_1 и l_2 - контура ABCD и PRST соответственно, r - расстояние между бесконечно малыми элементами \vec{dl}_1 и \vec{dl}_2 контуров l_1 и l_2 .

Модель с взаимно параллельными контурами

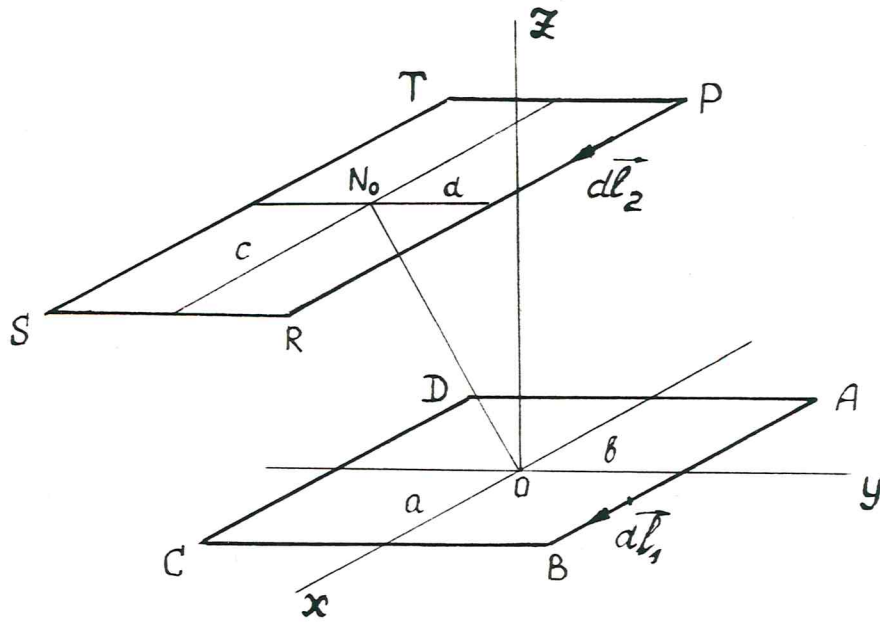


Рис. 4.1

Таблица 4.1

Пределы интегрирования для частичных индуктивностей

Взаимодействующие участки	α_1	β_1	α_2	β_2	F
AB - PR	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$	$(y_0 + d - b)^2 + z_0^2$
AB - ST	$-a$	a	$x_0 + c$	$x_0 - c$	$(y_0 - d - b)^2 + z_0^2$
CD - PR	a	$-a$	$x_0 - c$	$x_0 + c$	$(y_0 + d + b)^2 + z_0^2$
CD - ST	a	$-a$	$x_0 + c$	$x_0 - c$	$(y_0 - d + b)^2 + z_0^2$
DA - RS	$-b$	b	$y_0 + d$	$y_0 - d$	$(x_0 + c + a)^2 + z_0^2$
DA - TP	$-b$	b	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$(x_0 - c + a)^2 + z_0^2$
BC - RS	b	$-b$	$y_0 + d$	$y_0 - d$	$(x_0 - c - a)^2 + z_0^2$
BC - TP	b	$-b$	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$(x_0 + c - a)^2 + z_0^2$

Воспользуемся методом участков. Т.к. в числителе подинтегрального выражения стоит скалярное произведение $\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2$, то ненулевой вклад в (4.13) дают слагаемые, соответствующие взаимодействию параллельных сторон контуров. Поэтому взаимная индуктивность может быть представлена в виде суммы восьми однотипных слагаемых

$$M_{12} = 10^{-7} \left(\sum_{i=1}^4 M_i + \sum_{j=1}^4 M_j \right) \quad (4.14)$$

вида

$$M_i = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + f_y^2 + f_z^2}}, \quad (4.15)$$

$$M_j = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dy_1 \cdot dy_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dy_1 \cdot dy_2}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + f_x^2 + f_z^2}}, \quad (4.16)$$

где x_1, y_1, z_1 - координаты текущей точки контура l_1 , а x_2, y_2, z_2 - то же контура l_2 .

Расшифровка пределов интегрирования и постоянной $F = f_y^2 + f_z^2$ для всех частичных интегралов дана в таблице 4.1. При составлении программы расчета взаимной индуктивности, реализующей рассматриваемый алгоритм, целесообразно преобразовать эти данные к виду, представленному в соответствующем разделе сводной таблицы 4.3. В этом случае для задания массива пределов интегрирования используется минимальное количество переменных и программа приобретает компактную форму. По сравнению с таблицей 4.1. последовательность строк в таблице 4.3. изменена, поэтому каждое слагаемое из правой части (4.14) должно быть домножено на коэффициент $K_l = (-1)^l$:

$$M_{12} = 10^{-7} \sum_{l=1}^8 K_l \cdot M_l. \quad (4.17)$$

Поскольку вид первообразной (4.15) не будет отличаться от вида первообразной (4.16), ограничимся интегрированием (4.15). Для этого воспользуемся табличным интегралом

$$\int \frac{dx_2}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+F}} = \ln(|x_2-x_1| + \sqrt{(x_2-x_1)^2+F}) \quad (4.18)$$

Как видно, в скобках стоит модуль разности координат. Поэтому рассмотрим два случая - $x_2 > x_1$ и $x_2 < x_1$. Пропуская промежуточные выкладки, приведем результаты интегрирования

а) если $x_1 < x_2$, то

$$\begin{aligned} M_{\ell} = & \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_2-x_1)^2+F}} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ln(\alpha_2 - \alpha_1 + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2+F}) + \\ & + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2+F} - (\alpha_1 - \beta_1) \cdot \ln((\beta_2 - \alpha_1) + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2+F}) - \\ & - \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2+F} - (\beta_1 - \alpha_2) \cdot \ln(\alpha_2 - \beta_1 + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2+F}) + \\ & - \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2+F} + (\beta_1 - \beta_2) \cdot \ln(\beta_2 - \beta_1 + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2+F}) + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2+F}; \end{aligned} \quad (4.19)$$

б) если $x_2 < x_1$, то

$$\begin{aligned} M_{\ell} = & \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{dx_1 dx_2}{\sqrt{(x_1-x_2)^2+F}} = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \ln(\alpha_1 - \alpha_2 + \\ & + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2+F}) - \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2+F} - (\alpha_1 - \beta_2) \cdot \ln(\alpha_1 - \beta_2 + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2+F}) + \\ & + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2+F} - (\beta_1 - \alpha_2) \cdot \ln(\beta_1 - \alpha_2 + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2+F}) + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2+F} - \\ & - \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2+F} + (\beta_1 - \beta_2) \cdot \ln(\beta_1 - \beta_2 + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2+F}). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Несмотря на очевидные различия в знаках идентичных слагаемых, входящих в (4.19) и (4.20), результаты вычислений взаимной индуктивности по этим формулам совпадают по абсолютной величине и отличаются только знаком. Если руководствоваться правилом, согласно которому поток взаимной индукции через площадку, ограниченную контуром l_1 , созданный током в контуре l_2 , считается положительным, если совпадает по направлению с потоком собственной индукции контура l_1 , то правильный результат получается при использовании (4.19).

Необходимо отметить следующую особенность (4.19) и (4.20). При z_0 , отличном от нуля, правильная величина и знак взаимной индуктивности получаются при любом соотношении x_1 и x_2 . Однако, если $z_0 = 0$, а контура имеют одинаковые размеры и располагаются один за другим вдоль оси x или y , требуется строгое выполнение условий, оговоренных в пунктах а) и б). Поскольку

$$\begin{cases} x_0 - c < x_2 < x_0 + c \\ -a < x_1 < a \end{cases} \quad (4.21)$$

то совместное решение этих неравенств дает $x_0 > a + c$ для случая а) и $x_0 < -a - c$ для случая б).

При невыполнении этих требований выражения, стоящие под знаком логарифма в (4.19) и (4.20), в процессе вычисления интегралов с параметрами, указанными в четных строках таблицы 4.3, обращаются в ноль. Такая ситуация недопустима, т.к. приводит к прерыванию при выполнении задания на ЭВМ.

Операция нахождения пространственных производных взаимной индуктивности контуров наиболее простым образом может быть выполнена численно при помощи конечно-разностного метода

$$\frac{\partial M_{sq}}{\partial q} = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{M_{sq}(q + \Delta q) - M_{sq}(q)}{\Delta q}, \quad (4.22)$$

где q - обобщенная пространственная координата.

Некоторую сложность представляет здесь правильный выбор величины приращения координаты Δq , т.к. при стремлении повысить точность вычисления производной за счет уменьшения этого параметра мы сталкиваемся с погрешностями машинного вычисления самой взаимной индуктивности. Опыт показывает, что при небольшом расстоянии между контурами $|x_0| < a+c$ удовлетворительная точность вычисления производной может быть получена при $\Delta q = 1$ см. По мере дальнейшего увеличения x_0 погрешность вычисления $\frac{\partial M_{sq}}{\partial q}$ возрастает и может значительно превысить погрешность вычисления M_{sq} .

Для того, чтобы погрешность вычисления производной взаимной индуктивности была соизмерима с погрешностью вычисления самой взаимной индуктивности при любом расстоянии между контурами, необходимо использовать аналитические выражения для $\frac{\partial M_{sq}}{\partial q}$. Их можно получить, выполнив дифференцирование слагаемых суммы (4.14) по координатам центра контура $PRST$ x_0, y_0, z_0 , входящим в пределы интегрирования α_2, β_2 и подкоренные выражения F в (4.15) и (4.16)

$$\frac{\partial M_{sq}}{\partial q} = \sum_{l=1}^8 (-1)^l \frac{\partial M_l}{\partial q}. \quad (4.23)$$

Выполним дифференцирование первого члена

$$M_1 = \int_{-a}^a \int_{x_0-c}^{x_0+c} \frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_0-d-b)^2 + z_0^2}} \quad (4.24)$$

описывающего взаимодействие участков AB и ST контуров ($l=1$).

$$\frac{\partial M_1}{\partial x_0} = \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{dx_1}{\sqrt{(x_2-x_1)^2 + F}} \right) dx_2 =$$

$$\begin{aligned}
&= \ln(|\beta_2 - \beta_1| + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2 + F}) - \ln(|\beta_2 - \alpha_1| + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2 + F}) - \\
&- \ln(|\alpha_2 - \beta_1| + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2 + F}) + \ln(|\alpha_2 - \alpha_1| + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + F}); \quad (4.25)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_1}{\partial y_0} &= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial y_0} \left(\frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_0 - d - b)^2 + z_0^2}} \right) = \\
&= -\frac{y_0 - d - b}{F} \left(\sqrt{(\alpha_1 - \beta_1)^2 + F} - \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + F} - \right. \\
&\left. - \sqrt{(\beta_1 - \beta_2)^2 + F} + \sqrt{(\beta_1 - \alpha_2)^2 + F} \right); \quad (4.26)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_1}{\partial z_0} &= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial z_0} \left(\frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + f_y^2 + z_0^2}} \right) = \\
&= \frac{z_0}{F} \left(\sqrt{(\alpha_1 - \beta_1)^2 + F} - \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + F} - \sqrt{(\beta_1 - \beta_2)^2 + F} + \sqrt{(\beta_1 - \alpha_2)^2 + F} \right). \quad (4.27)
\end{aligned}$$

Очевидно, что для остальных трех слагаемых ($l = 2, 3, 4$), отвечающих за взаимодействие проводников, параллельных оси x , эти выражения также справедливы, но с учетом подстановки соответствующего f_{y_2} взамен f_{y_1} , стоящего в числителе (4.26).

При вычислении производных частных индуктивностей проводников, параллельных оси y ($l > 4$), необходимо использовать следующие выражения:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial M_l}{\partial x_0} &= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial x_0} \left(\frac{dy_1 \cdot dy_2}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + f_x^2 + f_z^2}} \right) = \\
&= -\frac{f_x}{F} \left(\sqrt{(\alpha_1 - \beta_1)^2 + F} - \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + F} - \sqrt{(\beta_1 - \beta_2)^2 + F} + \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{(\beta_1 - \alpha_2)^2 + F} \right); \quad (4.28)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{\ell}}{\partial y_0} &= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial y_2} \left(\frac{dy_1}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + F}} \right) dy_2 = \\ &= \ln(|\beta_2 - \beta_1| + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2 + F}) - \ln(|\beta_2 - \alpha_1| + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2 + F}) - \\ &- \ln(|\alpha_2 - \beta_1| + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2 + F}) + \ln(|\alpha_2 - \alpha_1| + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + F}); \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_{\ell}}{\partial z_0} &= \int_{\alpha_1}^{\beta_1} \int_{\alpha_2}^{\beta_2} \frac{\partial}{\partial z_0} \left(\frac{1}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + f_x^2 + f_z^2}} \right) dy_1 \cdot dy_2 = \\ &= -\frac{f_z}{F} \left(\sqrt{(\alpha_1 - \beta_1)^2 + F} - \sqrt{(\alpha_1 - \alpha_2)^2 + F} - \sqrt{(\beta_1 - \beta_2)^2 + F} + \sqrt{(\beta_1 - \alpha_2)^2 + F} \right). \end{aligned} \quad (4.30)$$

Вторая расчетная модель для этого случая изображена на рисунке 4.2. Один из контуров - ABCD - по-прежнему лежит в плоскости xoy , причем его центр расположен в начале системы координат, второй же контур повернут относительно стороны ST на угол 90° и лежит в плоскости $y = \text{const}$. Его геометрический центр находится в точке $N(x_0, y_0, z_0)$.

Поскольку участки RS и TP контура ℓ_2 перпендикулярны плоскости контура ℓ_1 , то коэффициент взаимной индукции содержит только первые четыре слагаемых из формулы (4.14), вид которых аналогичен (4.15). Пределы интегрирования $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ и постоянная $F = f_y^2 + f_z^2$ из подкоренного выражения представлены в таблице 4.2. В таблице 4.3. содержатся эти же данные, но в упорядоченной для программирования форме.

Таким образом, взаимная индуктивность между перпендикулярными контурами и ее пространственные производные могут быть вычислены следующим образом

$$M_{sq} = 10^{-7} \sum_{\ell=1}^{12} (-1)^\ell M_{\ell}, \quad (4.31)$$

где M_{ℓ} - частичная индуктивность двух параллельных проводников, вычисляется при помощи (4.19);

Модель с взаимно перпендикулярными контурами

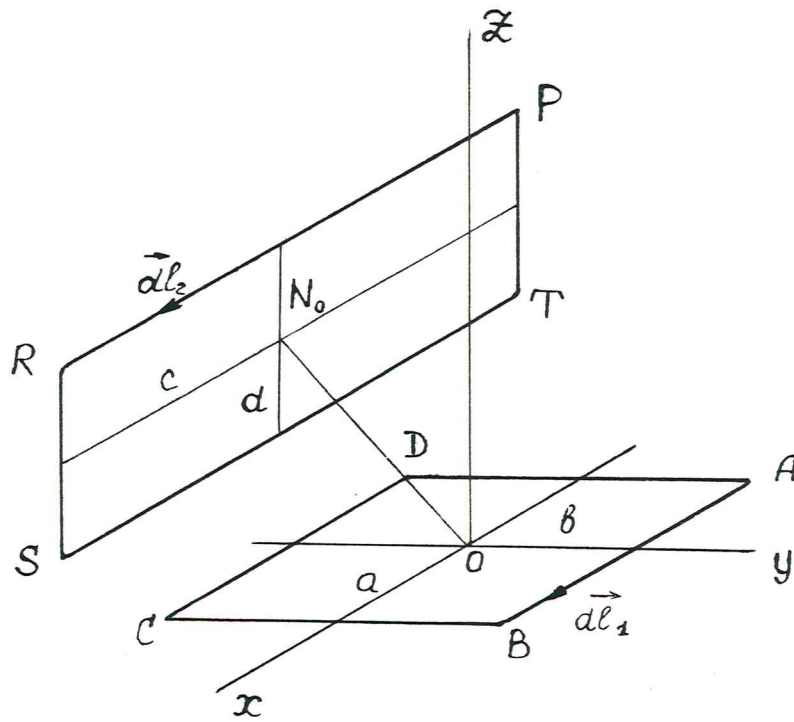


Рис. 4.2

Таблица 4.2

Пределы интегрирования для частичных индуктивностей

Взаимодействующие участки	α_1	β_1	α_2	β_2	F
AB - PR	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$	$(y_0 - b)^2 + (z_0 + d)^2$
AB - ST	$-a$	a	$x_0 + c$	$x_0 - c$	$(y_0 - b)^2 + (z_0 - d)^2$
CD - PR	a	$-a$	$x_0 - c$	$x_0 + c$	$(y_0 + b)^2 + (z_0 + d)^2$
CD - ST	a	$-a$	$x_0 + c$	$x_0 - c$	$(y_0 + b)^2 + (z_0 - d)^2$

Таблица 4.3

Пределы интегрирования для частичных индуктивностей

l	α_1	β_1	α_2	β_2	f_{xl}	f_{yl}	f_{zl}
1	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 - d - b$	z_0
2	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 + d - b$	z_0
3	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 + d + b$	z_0
4	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 - d + b$	z_0
5	$-b$	b	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$x_0 + c + a$		z_0
6	$-b$	b	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$x_0 - c + a$		z_0
7	$-b$	b	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$x_0 - c - a$		z_0
8	$-b$	b	$y_0 - d$	$y_0 + d$	$x_0 + c - a$		z_0
9	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 - b$	$z_0 - d$
10	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 - b$	$z_0 + d$
11	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 + b$	$z_0 + d$
12	$-a$	a	$x_0 - c$	$x_0 + c$		$y_0 + b$	$z_0 - d$

$$\frac{\partial M_{sq}}{\partial x_0} = 10^{-7} \sum_{l=9}^{12} (-1)^l \cdot (\ln(x_0 + c - a + \sqrt{(x_0 + c - a)^2 + F}) - \ln(x_0 + c + a + \sqrt{(x_0 + c + a)^2 + F}) - \ln(x_0 - c - a + \sqrt{(x_0 - c - a)^2 + F}) + \ln(x_0 - c + a + \sqrt{(x_0 - c + a)^2 + F})); \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial M_{sq}}{\partial y_0} = 10^{-7} \sum_{l=9}^{12} (-1)^{l+1} f_{y_l} (\sqrt{(x_0 - c - a)^2 + F} - \sqrt{(x_0 - c + a)^2 + F} - \sqrt{(x_0 + c - a)^2 + F} + \sqrt{(x_0 + c + a)^2 + F}) / F; \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial M_{sq}}{\partial z_0} = 10^{-7} \sum_{l=9}^{12} (-1)^{l+1} f_{z_l} (\sqrt{(x_0 - c - a)^2 + F} - \sqrt{(x_0 - c + a)^2 + F} - \sqrt{(x_0 + c - a)^2 + F} + \sqrt{(x_0 + c + a)^2 + F}) / F. \quad (4.34)$$

При дальнейшем усложнении конфигурации одного или одновременно обоих контуров применение метода участков на уровне учета взаимодействия параллельных проводников не оправдывает себя.

Действительно, при расчете только взаимной индуктивности контуров, изображенных на рис. 4.3 а, необходимо принимать во внимание уже 16 слагаемых. Что же касается вычисления производной $\frac{\partial M_{sq}}{\partial \varphi}$, то здесь нужно учитывать еще большее количество членов.

Этих сложностей можно избежать, если рассматривать контур сложной конфигурации не как совокупность последовательно соединенных прямолинейных проводников, а как результат пространственного совмещения трех и более плоских прямоугольных контуров, определенным образом соединенных электрически между собой.

Например, взаимная индуктивность контуров, изображенных на рис. 4.3 б, может быть представлена в виде четырех слагаемых, два из которых представляют собой взаимные индуктивности контура PRST с верхним и нижним горизонтальными контурами с координатами центра $(0, b, h)$ и $(0, b, -h)$, а другие два - взаимные индуктивности контура PRST с верхним и нижним вертикальными контурами с координатами центра $(0, 0, h/2)$ и $(0, 0, -h/2)$.

Модель с контуром выбранной конфигурации

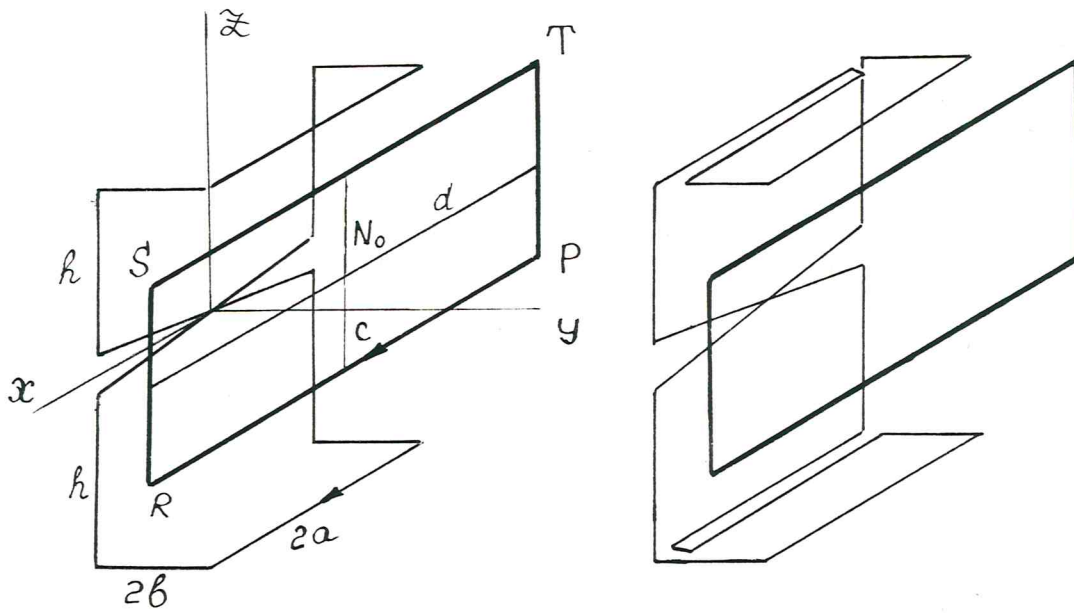


Рис. 4.3

Все выше сказанное было учтено при разработке программы расчета минимально допустимой МДС СПОВ и оценки удельных (в расчете на погонный метр длины статора) потерь мощности во вторичном элементе в конце цикла разгона.

В качестве объекта исследований была выбрана изображенная на рис.3.2. электродинамическая система подвеса со следующими отношениями размеров СПОВ и якорных катушек:

Параметры СПОВ:

длина и полюсное деление, м	варьировались от 1 до 50
ширина, м	0,3

Параметры якорных катушек:

шаг намотки, м	2
длина, м	1
общая высота, м	0,6
высота нижней петли, м	0,3
высота верхней петли, м	0,3
ширина нижней полки, м	0,2
ширина верхней полки, м	0,2
площадь поперечного сечения, см ²	16,5 или 33

Удельный расход материала проводника

якорных катушек на погонный метр ,кГ/м	25 или 50
--	-----------

Установившаяся температура катушек, °С

100	20
первый режим	второй режим
охлаждения	

При выборе материала проводника для якорных катушек системы подвеса предпочтение было отдано алюминию. Обладая лучшим чем медь отношением удельной электрической проводимости к объемной плотности, алюминий при том же весовом расходе обеспечивает меньшее сопротивление якорной катушки.

В отношении взаимного положения СПОВ и ЯК в поперечном сечении ОТС были приняты следующие допущения. Во-первых, верхние и нижние продольные проводники ЯК, а вместе с ними и СПОВ, находятся в одной плоскости. Это автоматически влечет за собой равенство боковых зазоров между ротором и стенками вакуумной оболочки. Во-вторых, на протяжении всего цикла разгона верхний и нижний зазоры между ротором и статором не становятся менее 0,1 м.

Масса ротора принималась равной 100 кг/м, так что при скорости 10 км/с нагрузка на систему подвеса должна составить 600 Н/м (силы упругой реакции ротора на растяжение игнорируются).

Расчет проводится в два этапа.

Целью первого этапа было определение МДС СПОВ, требуемой для обеспечения заданной силы подвеса при максимальной скорости ротора. Считаем, что ротор находится при этом в крайнем верхнем положении (верхний зазор равен 0,1 м).

Расчетные зависимости коэффициента взаимоиנדукции M_{sg} и его пространственных производных $\partial M_{sg}/\partial x_c$ и $\partial M_{sg}/\partial y_c$ от смещения СПОВ относительно ЯК вдоль оси x представлены на рис. 4.4. Как видно, кривые, построенные для $c = 2, 5$ и $12,5$ однотипны, кроме того, заметно, что область, в которой M_{sg} и $\partial M_{sg}/\partial y_c$ отличны от нуля, определяется в каждом случае неравенством $0 < x_c < c + 2a$.

Сравнивая результаты численного интегрирования выражений вида

$$A_1 = \frac{\hat{F}_z}{I_s^2} = \frac{2}{L_g \cdot \tau_s \cdot \tau_g} \int_0^{c+2a} M_{sg} \frac{\partial M_{sg}}{\partial z} dx;$$

$$A_2 = \frac{P_g}{I_s^2} = \frac{2R_g}{L_g^2 \cdot \tau_s \cdot \tau_g} \int_0^{c+2a} M_{sg}^2 dx$$

для различных соотношений c и a ($\frac{c}{a} \in \{1, 50\}$), получаем, что в высокоскоростном пределе длина СПОВ практически не оказывает влияния на величину средней силы подвеса, действующей на единицу длины ротора, а также величину удельных потерь во вторичном элементе (рис. 4.5).

Зависимости коэффициента взаимной индукции и его
пространственных производных от смещения СПОВ
относительно якорной катушки

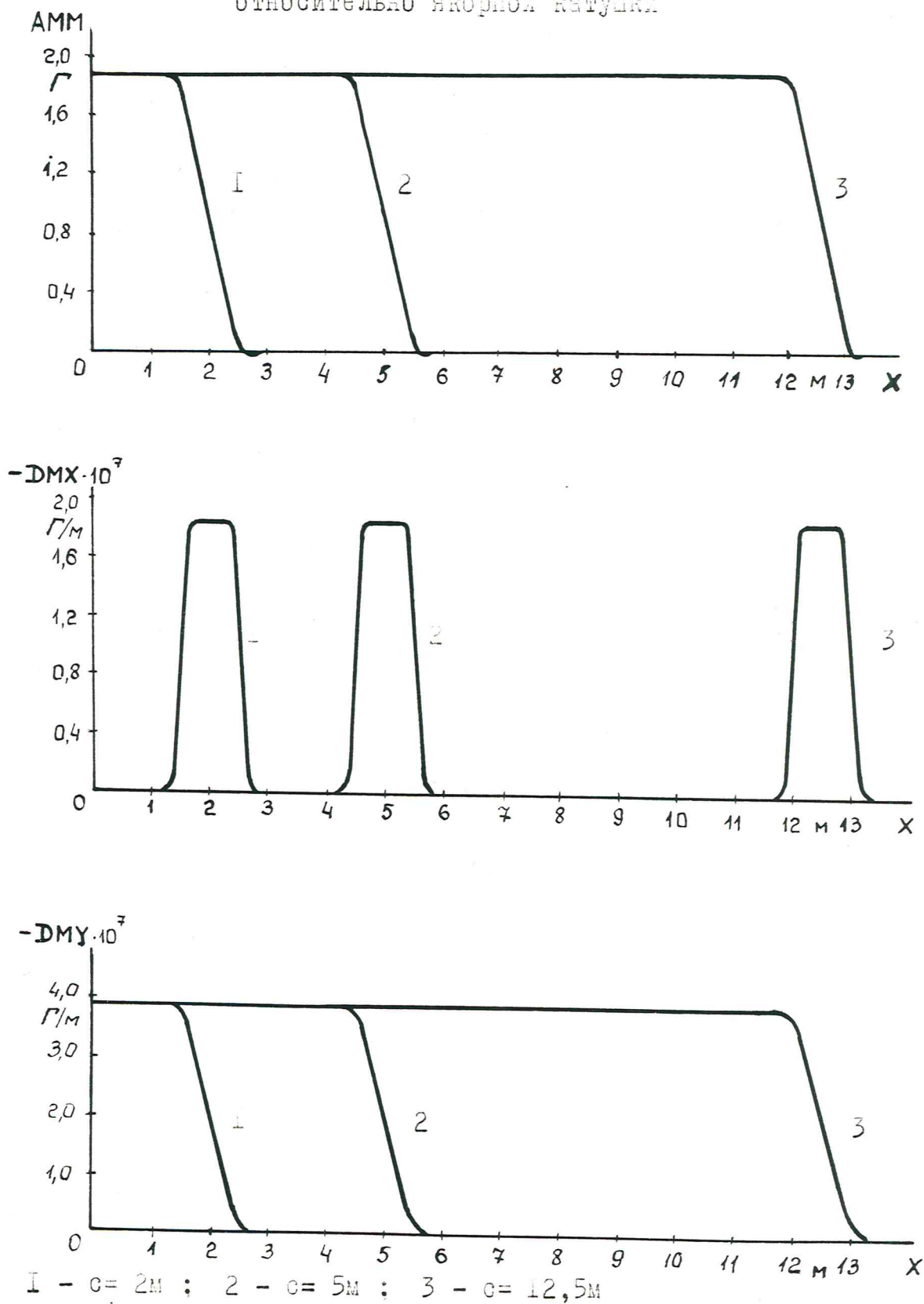


Рис. 4.4

Зависимости удельной силы подъёма и потерь
от соотношения длин СПОВ и ЯК в высокоскоростном
пределе

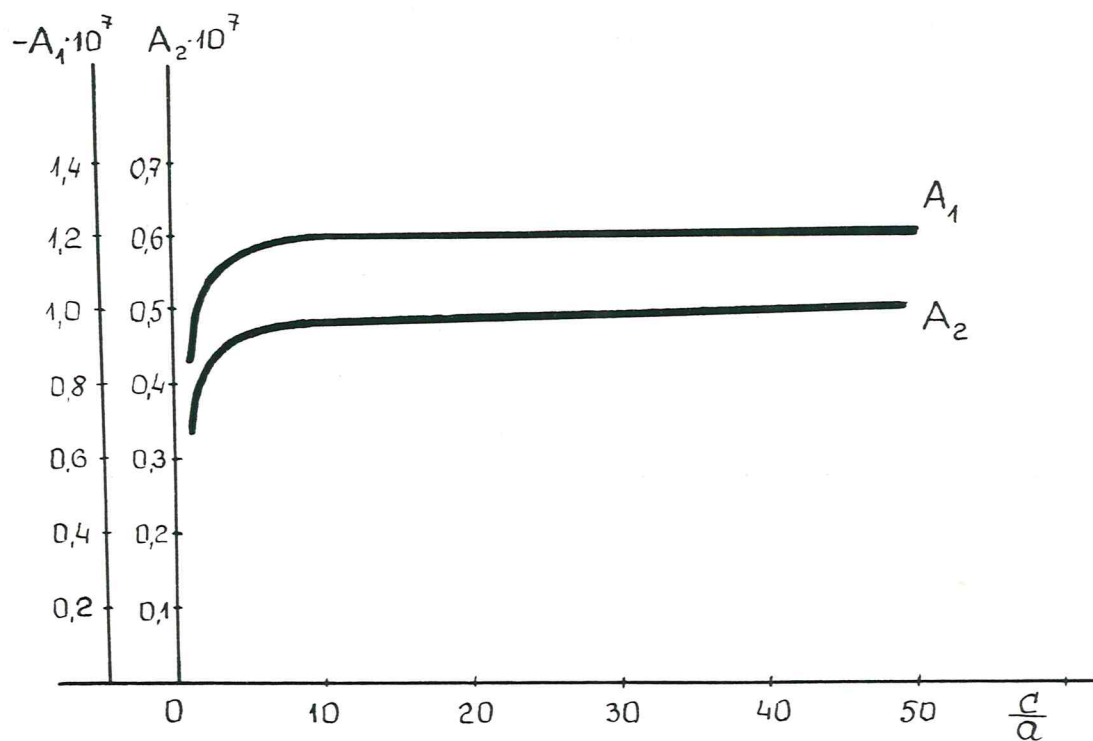


Рис. 4.5

Только при уменьшении длины СПОВ ниже 10 м наблюдается некоторое снижение этих параметров. В качестве первого приближения выберем значение A_I , которое оно достигает в зоне "плато", т.е. $A_I = -0,12 \cdot 10^{-6}$. Тогда минимально допустимая МДС СПОВ, необходимая для подвеса ротора при высоких скоростях, определяется из (4.9):

$$I_{s_{min}} = \sqrt{\frac{\hat{F}_L}{A_I}} = 71000 \text{ (A)}.$$

Учитывая, что при низких скоростях ($V < 1$ км/с) нагрузка на систему подвеса приблизительно в 1,7 раза выше чем при высоких, принимаем требуемую МДС СПОВ 120 кА (независимо от длины).

На втором этапе следует произвести корректировку предельной величины верхнего зазора между ротором и статором принятой МДС СПОВ. Поскольку нагрузка на систему подвеса считается на прежнем уровне, соответствующее ей значение $A_I = -0,42 \cdot 10^{-7}$ будет достигнуто при меньшем смещении ротора относительно центра вакуумной оболочки, а именно - при верхнем зазоре 0,131 м (см.рис. 4.6). При этом же зазоре $A_2 = 0,66 \cdot 10^{-7}$, поэтому потери во вторичном элементе от вихревых токов в соответствии с (4.11) составят при $V = 10$ км/с в лучшем случае (удвоенный расход проводника и второй режим охлаждения) 95 Вт/м, а в худшем случае (одинарный расход и первый режим охлаждения) -250 Вт/м.

4.3. Скоростные характеристики первого этапа

цикла разгона ротора

Главное отличие расчета левитационных характеристик системы подвеса при низких скоростях движения ротора от высокоскоростного предела состоит в учете реального характера реакции якоря. По мере уменьшения скорости ротора закон изменения вихревого тока в катушке подвеса все более отличается от (1.5), описывающего идеальный диамагнетизм ЯК, фазовый сдвиг между волнами МДС ротора и статора увеличивается, в результате чего сила торможения возрастает.

Зависимости удельной силы подъёма и потерь
от смещения ротора относительно статора

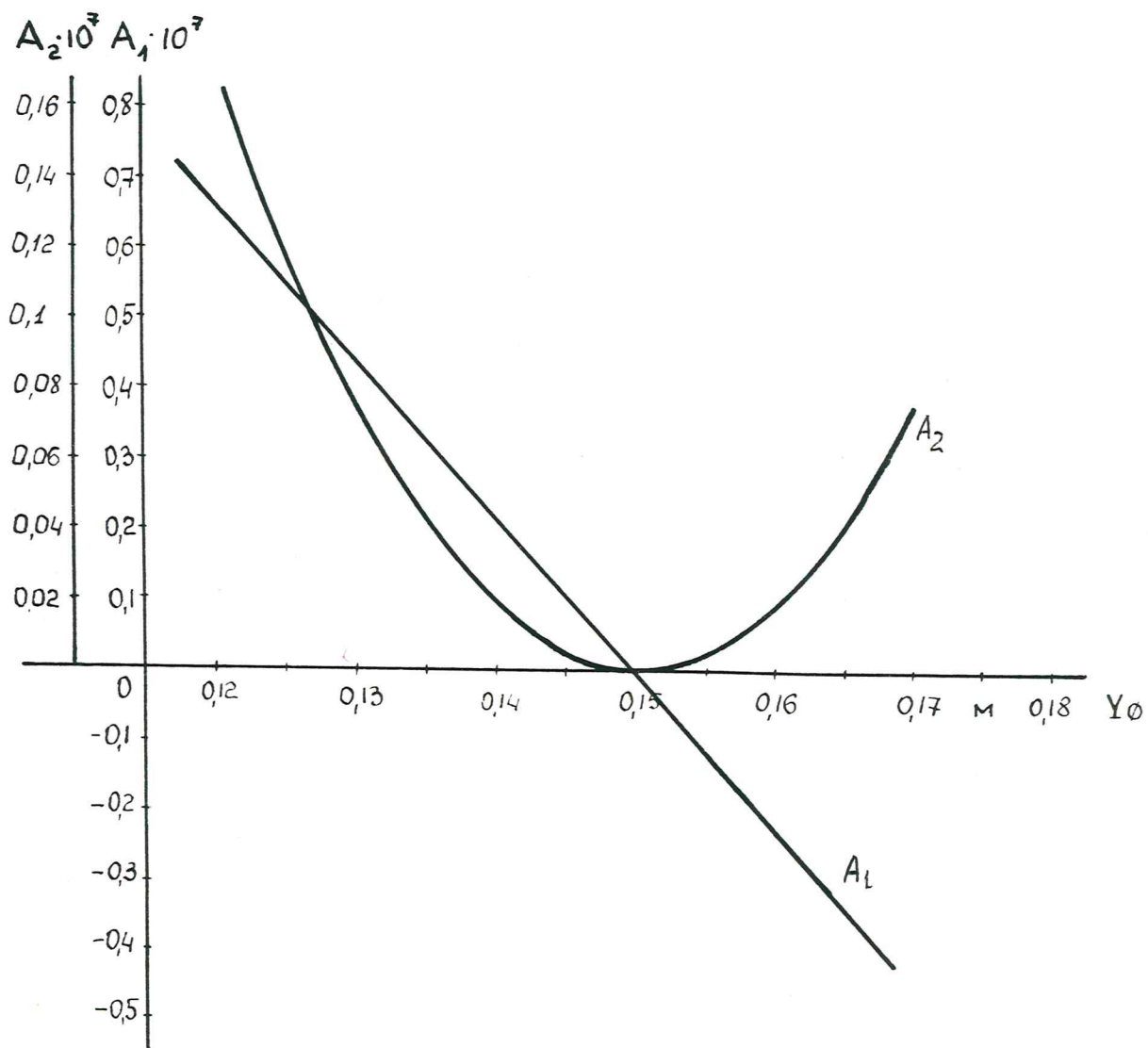


Рис. 4.6

Поведение вихревого тока в короткозамкнутой катушке подчиняется второму закону Кирхгофа:

$$L_g \frac{dI_g}{dt} + I_g R = E, \quad (4.35)$$

Вихревая ЭДС E может быть вычислена как производная по времени от потокосцепления ЯК и СПОВ, взятая с обратным знаком:

$$E = - \frac{\partial \Psi_{sg}}{\partial t} = - I_s \frac{\partial M_{sg}}{\partial t} = - I_s \cdot V \frac{\partial M_{sg}}{\partial x_0}.$$

При интегрировании уравнения (4.35) с постоянной правой частью (на k -ом интервале коммутации $\Delta t = \frac{\Delta x}{V}$) получим следующее рекуррентное соотношение для закона изменения тока в период времени $\{0, \Delta t\}$:

$$I_{gk} = \frac{E_k}{R} - \left(\frac{E_k}{R} - I_{gk-1}^* \right) e^{-\frac{R}{L_g} t}, \quad (4.36)$$

где I_{gk-1}^* - ток в ЯК на момент окончания предыдущего интервала коммутации;

E_k - ЭДС взаимоиנדукции, вычисленная в момент времени $t = \frac{\Delta t}{2}$;

k - номер интервала коммутации.

Для расчета средней силы подъема \hat{F}_L воспользуемся выражением (4.8), предварительно ограничив область интегрирования значениями $-c - 2a < x_0 < c + 2a$.

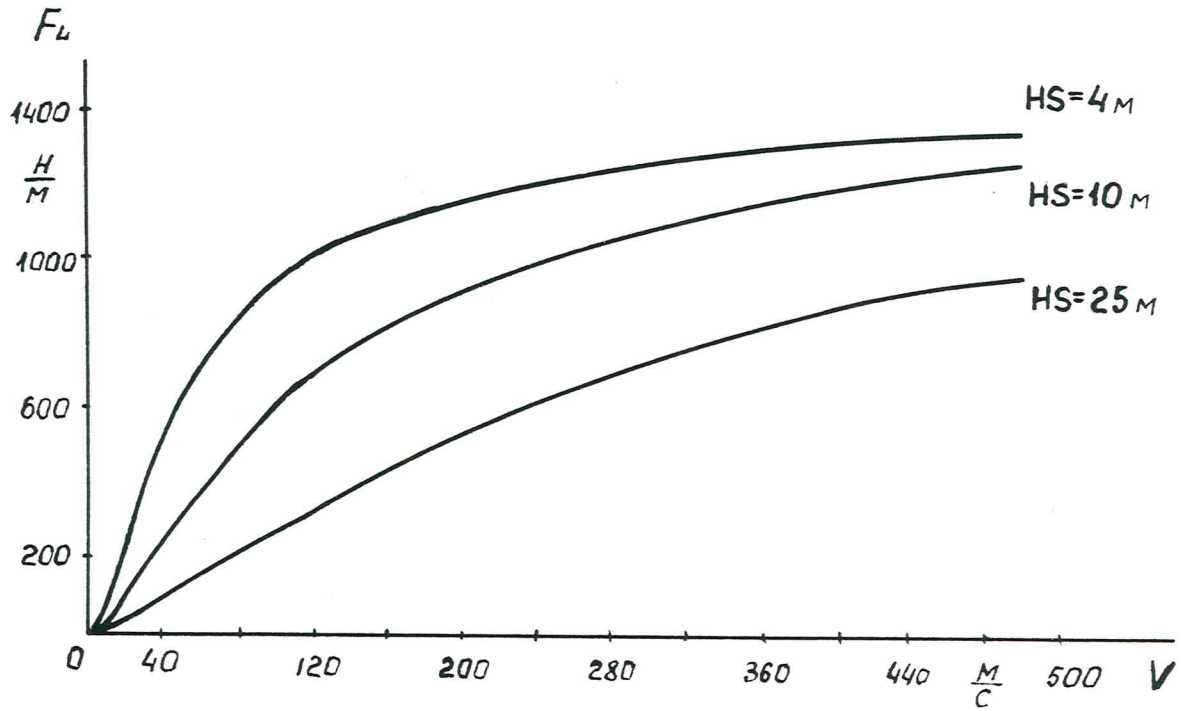
Среднюю силу торможения \hat{F}_d найдем аналогичным образом:

$$\hat{F}_d = \frac{I_s}{L_g} \int_{-c-2a}^{c+2a} I_g \frac{\partial M_{sg}}{\partial x_0} dx_0 = \frac{I_s}{L_g} \sum I_g(x_k) \cdot \frac{\partial M_{sg}(x_k)}{\partial x_0} \cdot \Delta x_0, \quad (4.37)$$

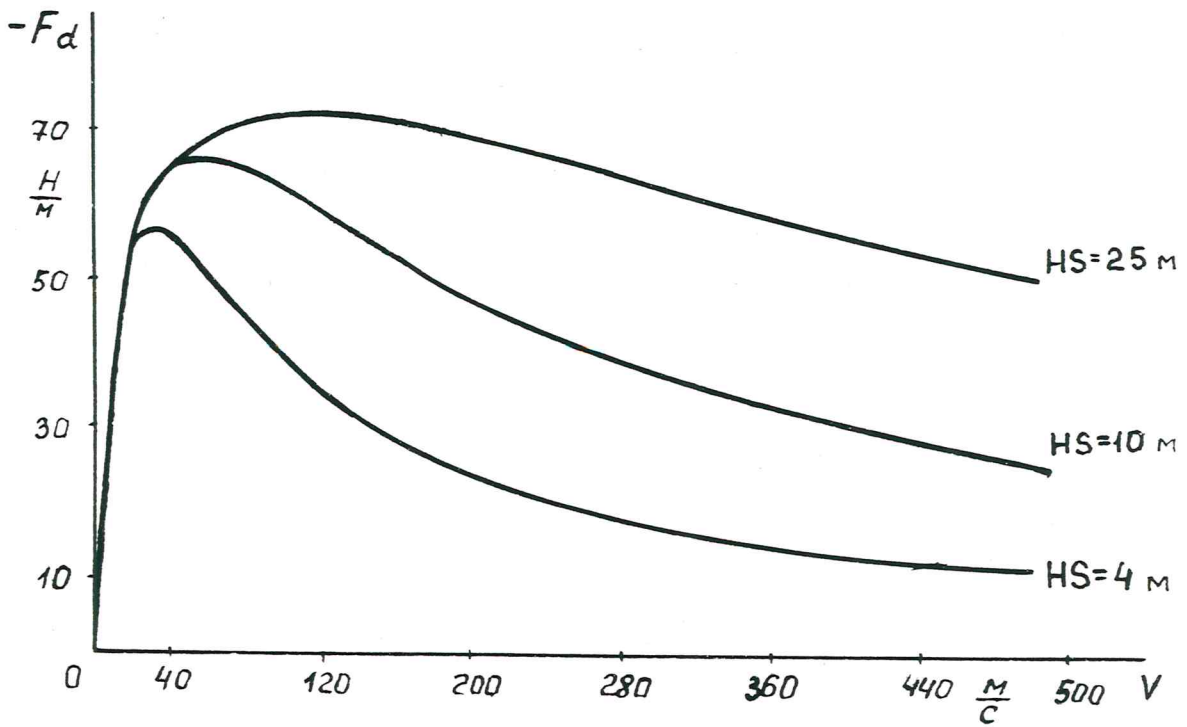
где x_k - узловые точки, используемые при численном интегрировании по формуле трапеций.

Результаты расчета средних значений сил подъема и торможения при различных соотношениях длин ЯК и СПОВ представлены на рис.4.7 и рис.4.8. Кривые, приведенные на рис. 4.7, относятся к случаю оди-

Зависимости средних сил подъёма и торможения от скорости для одинарного расхода алюминия и температуры якорных катушек 100 С



а



б

Рис. 4.7

нарного расхода алюминия (27 кг/м) и плохих условий охлаждения ($T_{\text{як}} = 100^\circ\text{C}$). Зависимости, изображенные на рис. 4.8, получены для удвоенного расхода алюминия (54 кг/м) и в предположении температуры якорных катушек 20°C . Оба рисунка иллюстрируют поведение \bar{F}_z и \bar{F}_d в диапазоне низких скоростей при неизменном зазоре между ротором и статором ($H=0, I_m$).

Анализируя результаты расчета, можно прийти к следующему заключению. Во-первых, полюсное деление СПОВ оказывает влияние в первую очередь на длину переходного участка подъемной характеристики. Чем длиннее СПОВ, тем при большей скорости подъемное усилие достигает значения, требуемого для подвески ротора. Во-вторых, с увеличением длины СПОВ происходит ухудшение тормозной характеристики. Максимум силы торможения смещается вправо, а ход кривой за точкой перегиба становится все более пологим.

Приблизительно в той же мере на вид кривых оказывает влияние расход алюминия. Увеличение погонного расхода материала проводника вакуумной оболочки, интенсификация процесса охлаждения ЯК подвеса способствуют улучшению тормозной и подъемной характеристик. Максимум силы торможения, хотя и не изменяется существенно по величине, смещается в зону скоростей ниже 100 м/с даже для 25-метровой СПОВ.

Если ограничить первый этап цикла разгона скоростью ротора 100 м/с (см. подраздел 3.2), то лишь при удвоенном расходе алюминия можно добиться бесконтактной подвески ротора к концу первого этапа. Из трех рассматриваемых СПОВ только четырех- и десятиметровая способны достичь силы подъема 1 кН/м при скоростях ниже 100 м/с. Вместе с тем, при расширении границ первого этапа до 150 м/с четырехметровая СПОВ также развивает достаточное усилие даже при одинарном расходе алюминия.

Зависимости средних сил подъёма и торможения от скорости для двойного расхода алюминия и температуры якорных катушек 20 °С

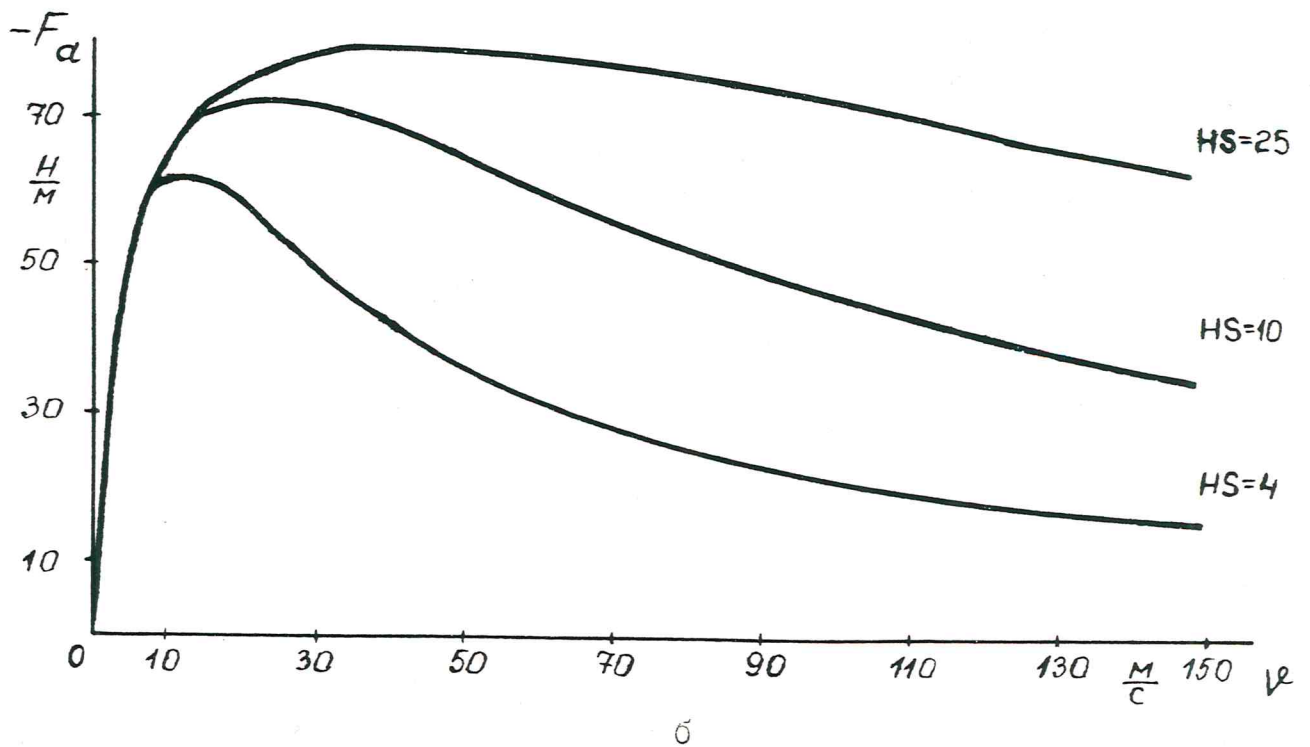
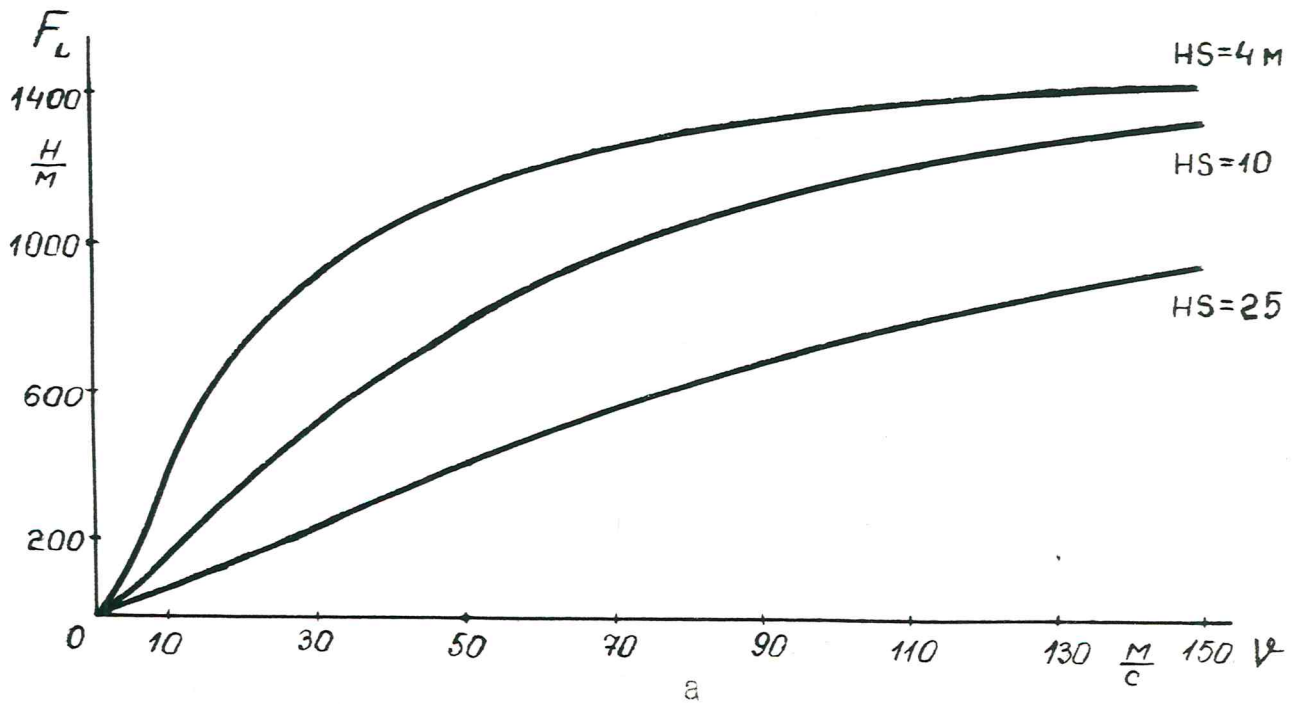


Рис. 4.8

4.4. Скоростные характеристики второго и третьего этапов цикла разгона

По мере увеличения скорости ротора, когда подъемное электродинамическое усилие превысит его вес, ротор начнет расширяться. Представляется небезынтересным знать, каким образом будет изменяться зазор между ротором и статором по мере того, как скорость ротора увеличится до 10 км/с, а также вид аналогичной зависимости для потерь мощности во вторичном элементе.

Оценка потерь производилась по (4.10), зазор H при данной скорости определялся из условия равенства среднего подъемного усилия весу ротора:

$$\hat{F}_L = M \left(g - \frac{2v^2}{D} \right). \quad (4.38)$$

Длина СПОВ принималась в расчетах 10 м, остальные параметры системы подвеса совпадают с данными из предыдущего раздела. По-прежнему рассматривались два варианта исполнения якорной системы - с одинарным расходом алюминия и температурой якорных катушек 100°C, а также с двойным расходом проводника и температурой 20°C. Результаты расчета представлены на рисунке 4.9.

Как видно, удельный расход проводника ЯК и способ их охлаждения существенно сказываются на величине потерь во вторичном элементе системы подвеса. Максимальные потери будут наблюдаться не при высоких скоростях, как может показаться на первый взгляд, а в диапазоне низких 100 - 400 м/с и средних скоростей 1-5 км/с.

В интервале скоростей 7-9 км/с потери на подвеску ротора будут весьма незначительными. Теоретически при скорости около 8 км/с ротор должен двигаться, не испытывая магнитного сопротивления и не теряя скорости при отключении двигателя. Таким образом, можно рекомендовать этот диапазон для работы ОТС в качестве высокоэффективного накопителя энергии.

Что касается скоростной зависимости зазора между ротором и статором, то здесь влияние расхода алюминия оказывается заметным

Скоростные зависимости зазора H между ротором и статором, а также удельных потерь в контурах подвеса для различных режимов охлаждения

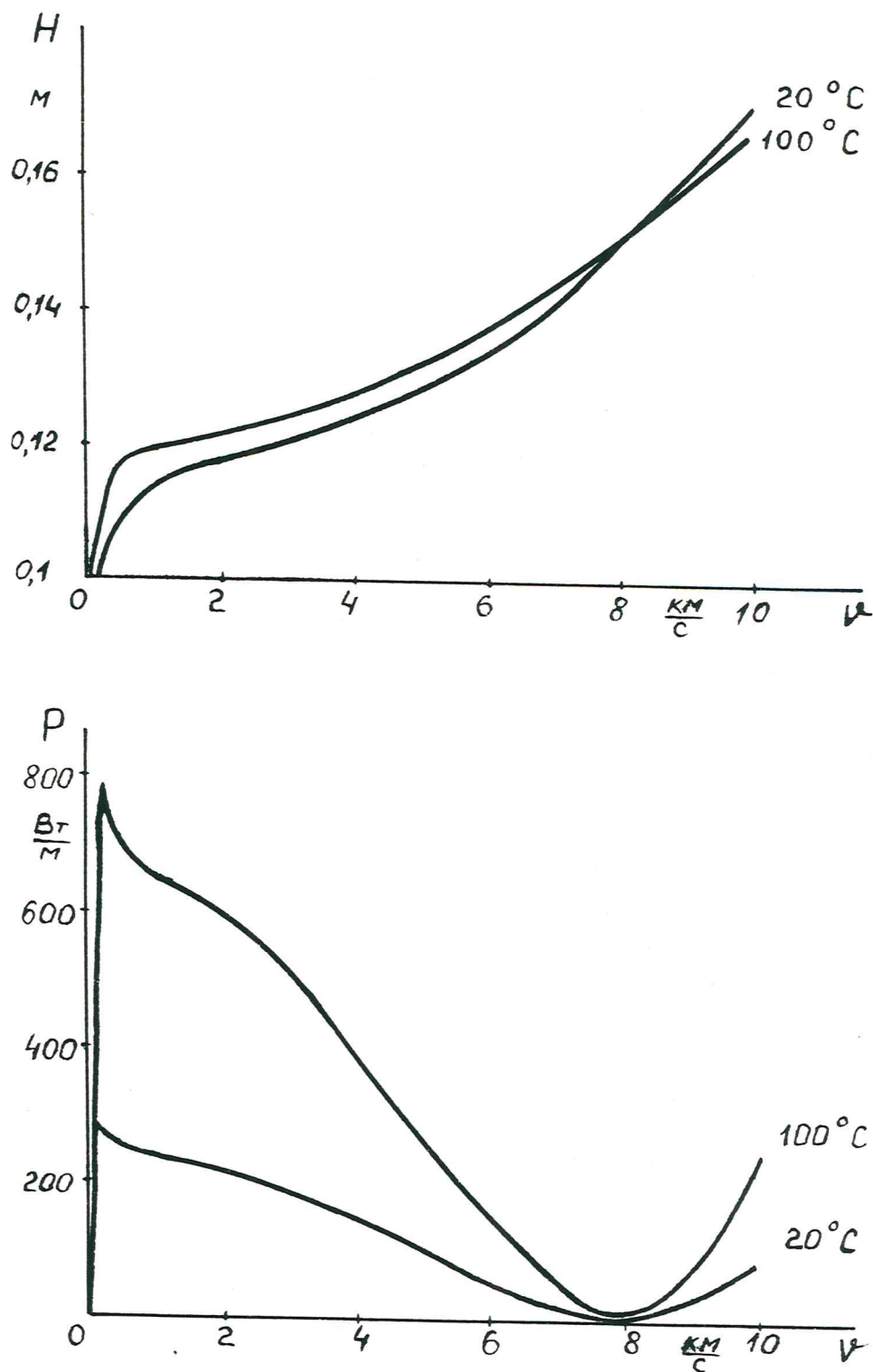


Рис. 4.9

только до 4-5 км/с. Далее кривые практически совпадают. Общее вертикальное перемещение ротора за второй и третий этапы цикла разгона независимо от расхода проводника якорных катушек составит 0,07 м. Чтобы уменьшить эту цифру, необходимо повышать МДС СПОВ.

4.5. Выводы

1. Как показывают расчеты, для обеспечения бесконтактной подвески ротора ОТС в диапазоне скоростей $10^2 \div 10^4$ м/с потребуются сверхпроводящие обмотки возбуждения с магнитодвижущей силой порядка 120 кА. По сравнению с уровнем МДС СПОВ, достигнутым в ВСНТ (840 кА), эта цифра представляется весьма умеренной.
2. Установлено, что, хотя длина СПОВ не оказывает существенного влияния на левитационные характеристики при высоких скоростях движения ротора, чрезмерное ее увеличение негативно сказывается на динамике изменения подъемного и тормозного усилий на начальном этапе разгона. Исходя из объема выполненных работ, в качестве компромиссного варианта для дальнейших исследований принята длина СПОВ 10 м.
3. Оценка потерь мощности во вторичном элементе (якорных катушках) предложенной системы электродинамического подвеса показала, что основным фактором, влияющим на уровень потерь, является удельный (в расчете на погонный метр) расход проводника вторичного элемента. Двухкратное (по отношению к принятому в ВСНТ) увеличение расхода алюминия, выбранного в качестве материала якорных катушек благодаря высокому отношению удельной электрической проводимости к объемной плотности, приводит также к снижению в той же мере потерь на протяжении всего процесса разгона ротора.
4. Максимальные потери мощности в ЯК будут иметь место при скоростях ниже 1 км/с. Потери при предельной скорости ротора (100-250 Вт/л) составляют порядка 35 % от максимального значения. Минимум потерь наблюдается при скорости около 8 км/с, однако в диапазоне 7-9 км/с они также будут весьма незначительными. При использовании ОТС в качестве накопителя энергии этот диапазон представляет наибольший интерес.

5. ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ И СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРИВОДА РОТОРА ОТС

5.1. Исходные данные и главные размеры

В качестве исходных данных для расчета двигателя привода ротора ОТС принимаем:

- удельную мощность, развиваемую двигателем $P_{2y} = I \cdot 10^3$ Вт/м
- Эта величина определяется максимальным значением мощности, диссипируемым в контурах системы подвеса, приведенным на рис. 4.9, и мощностью, необходимой для преодоления сил инерции ротора ОТС ;
- линейную скорость перемещения индуктора относительно якоря от 0 до 10000 м/с ;
- напряжение питания обмотки якоря $U = 3600$ В ;
- поперечный размер обмотки возбуждения - 0,5 м , следовательно
- длина активной части обмотки якоря $l = 0,5$ м ;
- диаметр якоря - $D = 12756320$ м ;
- система возбуждения - независимая ;
- режим работы - продолжительный.

При принятых исходных данных из главных размеров остается неопределенным лишь число пар полюсов двигателя $2p$, а следовательно и полюсное деление τ .

При увеличении числа пар полюсов:

- уменьшается полюсное деление $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, а следовательно длина и вылет лобовой части обмотки якоря, что ведет к ^{росту} к.к.п.д. двигателя за счет снижения электрических потерь в обмотке якоря, и уменьшению массы меди обмотки якоря;

- увеличивается число пар параллельных ветвей обмотки якоря, что снижает ток параллельной ветви и улучшает условия ее коммутации;

- уменьшается длина сверхпроводящей обмотки возбуждения индуктора, что позволяет сделать ее более технологичной.

Увеличение числа пар полюсов ограничено - повышением частоты, перематыванием обмотки якоря, что приводит к возрастанию добавочных электрических потерь. Эти потери от нормальной составляющей инерции определяются так

$$P_{эл.г} = \frac{\pi^2}{8} \sigma \cdot N \cdot h \cdot l \cdot d^3 (k_m B_m)^2 f^2$$

где
$$k_m = \sqrt{\frac{\sum_{\nu} B_{m\nu}^2 f_{\nu}^2 F_{\nu}(kd)}{B_m^2 f_m^2}}$$

$$F_{\nu}(kd) = \frac{\pi}{k\nu d^3} \frac{\operatorname{sh} k\nu d - \sin k\nu d}{\operatorname{ch} k\nu d + \cos k\nu d}$$

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu \nu}{2}}; \quad \omega = 2\pi f; \quad f = \frac{p n}{60},$$

σ - удельная электропроводность проводника; N - число проводников якоря; h и d - высота и ширина проводника; l - длина активной части якоря; B_m - максимальное значение индукции; f - частота вращения индуктора; n - число оборотов индуктора; p - число пар полюсов; k_m - коэффициент, определяющий величину эквивалентной индукции и учитывающий демпфирующее действие вихревых токов, форму кривой индукции и параметры обмотки якоря.

Эти потери, как показал опыт создания машин постоянного тока с гладким якорем (немагнитным активным слоем), могут достигать уровня основных электрических потерь;

- коммутационной способностью по времени тиристоров. Дело в том, что полное время коммутации современных быстродействующих тиристоров составляет величину порядка $150 \cdot 10^{-6}$ с. При скорости перемещения ротора $V = 10000$ м/с ширина зоны коммутации ($b_{з.к.}$) должна быть не менее 1,5 м.

Исходя из этих соображений целесообразно принять полюсное деление для двигателя ОТС $\tau = 50$ м.

5.2. Параметры обмотки якоря

Параметры обмотки якоря определяем исходя из расчета на одну сторону.

Мощность, развиваемая одной стороной двигателя

$$P_2' = P_{2y}' \cdot l_2 = 2 \cdot 10^{10} \text{ Вт}$$

Здесь: P_{2y}' - удельная мощность на единицу длины одной стороны якоря ($P_{2y}' = 0,5 P_{2y}$) ; l_2 - длина якоря $l_2 = \pi D$.

Ток якоря

$$I_a' = \frac{P_2'}{\eta \cdot U} = 5,6 \cdot 10^7 \text{ А}$$

Число пар полюсов

$$2p = \frac{\pi D}{\tau} = 8 \cdot 10^5$$

Принимаем в качестве обмотки якоря - одноходовую петлевою обмотку.

Число параллельных ветвей

$$2a' = 2p = 8 \cdot 10^5$$

Ток параллельной ветви

$$i_a' = I_a' / 2a' = 70 \text{ А}$$

Принимаем линейную нагрузку

$$As = 35 \cdot 10^2 \text{ А/м}$$

Число эффективных проводников обмотки

$$N = \frac{J_i D \cdot As}{i_a'} = 2 \cdot 10^9$$

Число секций на одну сторону якоря

$$K' = N' / 2 w_s = 1 \cdot 10^9$$

w_s - число витков в секции обмотки якоря.

Из условия обеспечения надежной коммутации принимаем $w_s = 1$.

Шаги обмотки якоря:

- первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{K^i}{2p} \pm \varepsilon = 1250$$

- укорочение обмотки принимаем равным 0 (диаметральная обмотка) ;

- результирующий шаг

$$y = m = 1$$

- второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = 1249$$

Секционное деление

$$t_k = \pi D / K^i = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Поперечное сечение проводника $q_{\text{я}}$ определяем исходя из принятой величины плотности тока $j_{\text{я}} = 1,03 \text{ А/мм}^2$

$$q_{\text{я}} = I_a' / j_{\text{я}} = 68 \text{ мм}^2$$

Средняя длина полувитка секции обмотки якоря

$$l_{\text{ср}} = l + 1,4 \tilde{r} = 70,5 \text{ м}$$

Полная длина проводников обмотки якоря на одну сторону

$$L'_{\text{м.я}} = N' \cdot l_{\text{ср.я}} = 140 \cdot 10^9 \text{ м}$$

Сопротивление обмотки якоря в холодном состоянии при температуре окружающей среды $t = 20^\circ \text{C}$

$$R_{\text{я}}' = 1,8 \cdot 10^{-2} L'_{\text{м.я}} / q_{\text{я}} \cdot (2a')^2 = 5,79 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Масса меди обмотки якоря на сторону

$$G'_{\text{м.я}} = 8,7 \cdot L'_{\text{м.я}} \cdot q_{\text{я}} = 82824 \cdot 10^3 \text{ кг}$$

Масса меди обмотки якоря полного двигателя на один погонный метр

$$G_{\text{м.я.дв}} = G'_{\text{м.я}} \cdot 2 / l_2 = 42 \text{ кг}$$

Стоимость меди на один погонный метр $\sim 80 \text{ руб/м.}$

Масса на один погонный метр немагнитного фиксирующего слоя стеклопластик СТЭ-I - 200 кг. Его стоимость 1120 руб/м.

Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{\text{эл}} = I_{\text{я}}'^2 \cdot R_{\text{я}}' = 18 \cdot 10^9 \text{ Вт}$$

5.3. Тиристорный коммутатор

В двигателе предполагается использовать коммутатор на базе запираемых тиристоров, который выполняет роль контакта "щетка-коллектор" машины постоянного тока. Коммутатор представляет собой совокупность силовых тиристорных ключей, каждый из которых одним выводом присоединен к группе секций обмотки якоря, а другим - к фидеру соответствующей полярности. В свою очередь, каждый ключ состоит из встречно-параллельно соединенных тиристора и диода с устройствами защиты и контроля.

Ключ состоит из следующей элементной базы: тиристор ТЗГ7З-2500-40, диод ДД4З-630-40, защитная цепочка РСД. Он имеет следующие параметры: максимально допустимое напряжение - 3600 В, максимально допустимый импульсный ток - 2500 А, время включения 10^{-5} с, время выключения $40 \cdot 10^{-6}$ с. Двумя ключами можно коммутировать одновременно 20 секций. При современной стоимости такого ключа в силу его экспериментального производства в нашей стране 1000 рублей, стоимость коммутатора на один погонный метр ОТС составит 2500 руб.

5.4. Сверхпроводящая обмотка возбуждения

Проблемы, связанные с применением низкотемпературной сверхпроводимости.

Требуемую для разгона ротора мощность двигатель разовьет при условии, что индукция в зоне расположения обмотки якоря будет равна

$$B_{\text{ср}} = P_2' / V \cdot 2\rho \cdot \ell \cdot \tau \cdot \lambda_s = 2,85 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$$

Найдем, на каком расстоянии от обмотки возбуждения индуктора с м.д.с. $I_{\text{ОВ}} = 120000$ А (предполагается использовать ту же обмотку возбуждения, что и для системы подвеса и направления ротора ОТС) необходимо расположить обмотку якоря, чтобы индукция была равна $2,85 \cdot 10^{-5}$ Тл. Это расстояние можно определить через коэффициент взаимоиנדукции между сверхпроводящим контуром обмотки возбуждения и контуром, расположенным в зоне обмотки якоря, длиной τ и шириной ℓ .

С одной стороны этот коэффициент равен

$$M_{ср} = \frac{B \delta_{ср} \cdot l \cdot \tilde{I}}{I_{о.в.}}$$

С другой стороны

$$M_{ср} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\tilde{I} \ln \left(\frac{\tilde{r} + \sqrt{\tilde{r}^2 + \delta^2}}{\tilde{r} + \sqrt{\tilde{r}^2 + \rho^2 + \delta^2}} \cdot \frac{\sqrt{\rho^2 + \delta^2}}{\delta} + \right. \right. \\ \left. \left. + l \ln \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + \delta^2}}{l + \sqrt{\tilde{r}^2 + \rho^2 + \delta^2}} \cdot \frac{\sqrt{\tilde{r}^2 + \delta^2}}{\delta} + 2 \sqrt{\tilde{r}^2 + \rho^2 + \delta^2} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \sqrt{\tilde{r}^2 + \delta^2} - \sqrt{l^2 + \delta^2} + \delta \right) \right]$$

Приравнивая правые части этих выражений, находим величину зазора $\tilde{\delta}$ между обмоткой якоря и сверхпроводящей обмоткой возбуждения = 0,95 м.

При постоянстве магнитного потока, создаваемого сверхпроводящей обмоткой возбуждения индуктора, а также постоянстве величины тока якоря $I'_{я} = 5,6 \cdot 10^7$ А разгон ротора ОТС осуществляется за счет изменения напряжения, подводимого к фидеру якоря

$$U(t) = \frac{N'}{2p} B \delta_{ср} \cdot l \cdot v(t) + I'_{я} \cdot R_{я}$$

Закон изменения скорости движения ротора во времени $v(t)$ определяется из следующего соотношения

$$M \frac{dv(t)}{dt} \cdot v(t) = P'_{эу} - P_d(t)$$

где $M \frac{dv(t)}{dt} \cdot v(t)$ - механическая мощность, придающая ускорение ротору;

$P'_{эу}$ - удельное значение электромагнитной мощности, развиваемой двигателем;

$P_d(t)$ - мощность диссипируемая в контурах электродинамического подвеса и направления ротора ОТС.

После ряда преобразований получим выражение закона изменения скорости движения ротора ОТС в следующем виде

$$v(t) = \frac{\sqrt{2} [P_{2y}' - P_d(t)] t}{M}$$

В начале разгона $v(t) = 0$ и напряжение $U = 3242$ В, в конце разгона $v(t) = 10^4$ м/с, $U = 3598$ В.

Если в качестве материала для обмотки возбуждения взять современный жесткий сверхпроводник второго рода на базе $Nb-Ti$ или Nb_3Sn , то масса обмотки возбуждения на один погонный метр составит 10 кг, а стоимость - 550 руб/м.

Однако для нормального функционирования обмотки возбуждения из таких материалов необходимо обеспечить ее криостатирование при температуре $9 \div 18$ К, то есть необходим криостат, работающий на гелиевом уровне температур. Такой криостат включает в себя: резервуар жидкого гелия, систему экранно-вакуумной тепловой изоляции, внешний вакуумный кожух, систему передачи усилий от сверхпроводящей катушки к внешнему вакуумному кожуху, а также систему гелиевых, вакуумных и токовых коммуникаций. И хотя габаритные размеры этого устройства в направлении рабочих зон могут превышать размеры сверхпроводящей катушки возбуждения на $5 \div 10$ мм, масса криостата, в лучшем случае, может составить $60 \div 50$ % от массы обмотки.

В процессе работы криостата в составе ротора ОТС возникает весьма важная проблема эвакуации испарившегося хладагента. Дело в том, что при работе сверхпроводящей магнитной системы к жидкому гелию всегда имеет место теплоприток: либо за счет внутренних тепловыделений в сверхпроводящей катушке, либо за счет теплопроводности по опорам, лучистого переноса, а также остаточными газами в вакуумном пространстве криостата. Под влиянием этих теплопритоков гелий испаряется. В существующих на сегодняшний день сверхпроводящих магнитах - эта проблема решается тремя путями.

Наиболее простой - это метод "открытой ванны", когда испаряющейся гелий уходит в атмосферу. Второй метод - так называемая "изохорическая дьюарная система". В этом случае испаряющейся гелий собирается в специальную емкость. При достижении определенного давления емкость заменяется на другую. И наконец, рефрижераторный метод. При этом испаряющийся гелий поступает в рефрижератор, где охлаждается и сжижается, а затем обратно подается в резервуар жидкого гелия криостата. Очевидно, что при разгоне ротора ОТС, который будет длиться более 10 суток, ни одна из перечисленных систем не может быть приемлема.

5.5. Выводы

Расчет двигателя постоянного тока с тиристорным коммутатором и сверхпроводящей обмоткой возбуждения показал, что на приемлемом уровне электромагнитных нагрузок и существующей элементной базе он принципиально реализуем для привода ротора ОТС при стоимости элементной базы ориентировочно $4250 \div 5000$ руб./м. Существенным его недостатком является низкий к.п.д. (10%). Это обусловлено высоким уровнем электрических потерь в обмотке якоря из-за большого полюсного деления τ ($\tau/\ell = 100$). Последнее обстоятельство связано с коммутационной способностью существующих тиристоров ($t_{ком} = 150 \cdot 10^{-6}$ с). Если бы это время удалось уменьшить до значений 10^{-6} с, то полюсное деление можно было бы взять равным 5 м, и, приняв соответствующие меры по уменьшению добавочных потерь в обмотке якоря, достигнуть к.п.д. порядка 45%.

Применение для обмотки возбуждения жестких сверхпроводников второго рода на базе $Nb-Ti$ и Nb_3Sn нереально вследствие неприемлемых весовых показателей сверхпроводящих магнитных систем (масса погонного метра сверхпроводящей магнитной системы соизмерима с полезной массой погонного метра ротора ОТС), а также вследствие отсутствия возможности подачи жидкого гелия в криостат и эвакуации

испарившегося гелия в процессе разгона ротора.

Предлагаемая система реализуема может быть только при наличии высокотемпературных сверхпроводников обладающих $T_c = 0 \div 20^\circ\text{C}$,
 $j_c = 500 \text{ A/mm}^2$ при $B = 2 \div 3 \text{ Тл}$.

6. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СИЛЬНОТОЧНОЙ И ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

В предыдущем разделе указывалось, что возможность реализации электродинамического подвеса ротора ОТС связано с применением для этих целей высокотемпературной сверхпроводимости.

Для оценки проблем высокотемпературной сверхпроводимости уместно вкратце остановиться на состоянии вопроса, связанного с разработкой технических сверхпроводников, применяемых в настоящее время для создания сверхпроводящих магнитных систем [63].

Современный сверхпроводящий обмоточный материал представляет собой сложную композитную конструкцию, состоящую из металлов с различными электрическими, теплофизическими, механическими и другими свойствами, покрытую, как правило, слоем изоляции. В зависимости от предназначения сечение технического сверхпроводящего материала меняется от долей квадратного миллиметра до нескольких квадратных сантиметров, и, соответственно, рабочие токи изменяются от единиц ампер до десятков килоампер. Диаметры сечений единичных жил и волокон собственно сверхпроводника в такой конструкции лежат в диапазоне от десятка до долей микрона. Количество волокон сверхпроводника в проводе (кабеле, шине) колеблется от единиц до сотен тысяч. Размеры перегородок между сверхпроводящими жилами меняются от единиц до долей микрона. Такие же размеры в техническом материале имеют резистивные перегородки, вводимые для уменьшения поперечной проводимости провода, и диффузионные барьеры, препятствующие взаимной диффузии разнородных компонентов. Расположение волокон в проводе спиралеобразно - он скручен вдоль продольной оси. В более сложных конструкциях токонесущих элементов осуществляется транспозиция образующих проводов. Такая сложная конструкция технического сверхпроводящего материала вызвана необходимостью удовлетворить достаточно против-

речивым требованиям, и в первую очередь обеспечить устойчивость сверхпроводящего состояния в условиях работы СМС.

В целом требования к сверхпроводящим проводам, кабелям и шинам для СМС различного назначения, а также принципы их конструирования ясны. В их основе лежат понятные теперь электро-, тепло- и механофизические принципы, подтвержденные накопленным опытом создания СМС.

До последнего времени промышленно освоенными по существу были только два сверхпроводника: сплав $Nb - Ti$ и интерметаллическое соединение Nb_3Sn . Сплав $Nb - Ti$ имеет следующие критические параметры: температура перехода в сверхпроводящее состояние T_c в нулевом магнитном поле при нулевом токе - 10 К, предельное магнитное поле B_{c2} при 4,2 К и нулевом токе - 12 Т, плотность критического тока J_c при $T=4,2$ К в магнитном поле с индукцией 5 Т - 10^9 А/м². Его существенные достоинства - высокая технологичность; возможность безопасного деформирования, относительно низкая стоимость. За последние 10 лет в результате значительного усовершенствования технологии производства в этом материале удалось поднять величину J_c в 2,5-3 раза. Это достигнуто разработкой и использованием приемов термомеханического воздействия на сплав, обеспечивающих создание оптимальной дефектной структуры, определяющей высокую токонесущую способность, но при этом сохраняющих целостность и однородность ультратонких волокон сверхпроводника в проводе. Использование таких проводов в обмотках магнитных систем позволяет получать конструктивную плотность тока примерно в 10 раз выше, чем в лучших медных обмотках.

Промышленная технология материалов на основе интерметаллического соединения Nb_3Sn создана и освоена в середине 70-х годов. Этот материал имеет критическую температуру $T_c = 18,3$ К в нулевом магнитном поле при нулевом токе, критическое магнитное поле - 22 Т при 6,2 К и нулевом токе, достигнутая в лучших промышленных образ-

цах плотность критического тока j_c составляет более $1,2 \cdot 10^9$ А/м² в поле, равном 10 Т, при 4,2 К. Имея очевидные преимущества критических параметров по сравнению со сплавом Nb - Ti, материал на основе интерметаллида Nb₃Sn характеризуется более низкой технологичностью и высокой чувствительностью критического тока к механическим деформациям. Крупномасштабное промышленное производство сверхпроводящих материалов на основе Nb₃Sn было впервые осуществлено в нашей стране.

Промышленный выпуск технических сверхпроводящих материалов производится во многих экономически развитых странах. За последние десятилетия объем их производства возрос примерно в 10 раз и составляет, по достоверным оценкам, до нескольких сотен тонн в год, при устойчивой тенденции к росту. Стоимость современных промышленных сверхпроводящих материалов значительно снижена по сравнению с начальным этапом работ и составляет (в зависимости от сложности конструкции провода или кабеля и масштабов партии) от одного до нескольких долларов за килоамперметр (такая единица измерения, как стоимость килоамперметра, позволяет сравнивать между собой различные по сечению и токонесущей способности технические сверхпроводящие материалы).

Еще недавно считалось общепризнанным, что сверхпроводящие материалы пригодны для создания СМС, генерирующих либо стационарные, либо меняющиеся с частотой в сотые доли герца магнитные поля.

Однако в последние три года в этой области возник своего рода прорыв. Получены первые обнадеживающие результаты по разработке конструкций, выпуску опытных партий и испытаниям технических сверхпроводящих материалов и модельных систем из них, пригодных для токов промышленной частоты (50-60 Гц). В соленоидах, модельных трансформаторах и других модельных системах из новых сверхпроводящих материалов удается снизить потери на переменном токе в 5000-10000 раз по сравнению с потерями в таких же системах, но изготовленных из обычных проводников и работающих при комнатной температуре.

Что же представляет собой новый сверхпроводящий материал и благодаря чему удается столь значительно снизить в нем потери на промышленной частоте? Созданный, например, на основе $Nb-Ti$ единственный провод - композит диаметром $8 \cdot 10^{-2}$ мм, содержащий около 250 тыс. волокон диаметром $8 \cdot 10^{-2}$ мкм в медно-никелевой матрице (сплав меди и 30% никеля). Гистерезисные потери в нем снижены за счет уменьшения диаметра волокон, а вихревые - за счет повышенного сопротивления матрицы и малого шага скручивания.

Примечательно то обстоятельство, что от открытия явления сверхпроводимости в 1911 году Камерлинг-Оннесом до начала широкомасштабного производства и использования технических сверхпроводящих проводов прошло более полувека. Сверхпроводник из Nb_3Sn с $T_c = 18,1$ К был открыт в 1954 г, а в сверхпроводящих магнитах начал применяться в середине 70 годов.

На протяжении всего времени с момента открытия явления сверхпроводимости учеными, занимающимися этой проблемой, велась непрерывная работа по поиску материалов с более высокой критической температурой. Однако, начиная с 1973 года, когда был получен сверхпроводник Nb_3Ge с критической температурой 23-24 К, дальнейшие попытки повысить T_c не принесли успеха до 1986 г. Таким образом, критическая температура сверхпроводников за минувшие 35 лет повысилась всего на 19 К. При этом было изучено более 1500 различных материалов (металлов, сплавов, интерметаллических соединений, полупроводников, полимеров), которые в определенных условиях например, при высоких давлениях и очень низких температурах становятся сверхпроводниками. Существующие теории сверхпроводимости ГЛАГ и БКШ никаких указаний на то среди каких материалов следует искать "теплые" сверхпроводники не дают.

Однако работы в направлении поиска высокотемпературных сверхпроводников велись довольно упорно. Так, один из основоположников теории ГЛАГ академик В.Л.Гинзбург, научное сообщение, посвященное

открытию высокотемпературной сверхпроводимости [64], начал с цитаты заключения своего доклада о высокотемпературной сверхпроводимости 1971 года "... при исследовании возможностей создания высокотемпературных сверхпроводников оправданы широкие и непредвзятые поиски в любых осмысленных направлениях. Одно лишь кажется нам недопустимым - игнорировать эту важную и интересную физическую проблему сегодняшнего дня".

В прошлом неоднократно появлялись сенсационные сообщения об открытии высокотемпературной сверхпроводимости, которые на поверку оказались ложными. Поэтому серьезные физические журналы стали с большой осторожностью относиться к публикации таких работ без предварительной проверки их результатов компетентными специалистами [65]. Возможно, что именно этим объясняется полугодовой период между представлением работы Г.Беднорца и К.Мюллера, сотрудников цюрихской лаборатории фирмы IBM, и ее публикацией осенью 1986г.

Эти авторы по истечению трех лет работы по поиску новых сверхпроводников на металлооксидной керамике $Ba-L a-Si-O$ обнаружили резкое падение сопротивления при $T \sim 30 K$, но очень низких значений сопротивления они не наблюдали. Поэтому свою работу они озаглавили так: "Возможная высокотемпературная сверхпроводимость в системе $Ba-L a-Si-O$ ". Оказалось, однако, что именно металлооксидные керамики $Ba-L a-Si-O$ и другие являются высокотемпературными сверхпроводниками. Это было доказано дальнейшими работами в Швейцарии, Японии и США, опубликованными уже в 1987г. Особенно четкий эффект высокотемпературной сверхпроводимости был получен при замене бария стронцием керамика состава $L a-Sr-Si-O$. Начало резкого падения сопротивления происходило при температуре 38,5 K, а при температуре 28,5 K оно становилось столь мало, что его не удавалось измерить.

С момента публикации упомянутой статьи Г.Беднорца и К.Мюллера весь научный мир занялся интенсивнейшими исследованиями в этой области. Так, в США за 1988 год по ВТСП опубликовано более 3000 ста-

тей. В исследования вовлечены 40 объединений научных сотрудников и 30 компаний. На эти цели отпущено 213 млн. долларов (80 млн - бюджет, 70 млн - промышленность и 63 млн - военное ведомство) .

Исследования ведутся в трех направлениях:

- в направлении получения материала с более высокой критической температурой;
- в направлении получения приемлемых для силовоточной электротехники значений критической плотности тока;
- в направлении получения высокотемпературных керамических сверхпроводников в такой форме, которая допускала бы их использование в сверхпроводниковых устройствах.

Основные пути для достижения поставленных целей - подбор исходных материалов компонент керамических сверхпроводников и варьирование технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводников.

После получения сверхпроводимости на металлооксидной керамике Ba-La-Si-O и La-Sr-Si-O тщательному исследованию подверглась система с иттрием Y-Ba-Si-O при различном соотношении компонентов. Установлено, что соединение $Ba_2YCu_3O_{6.9}$ переходит в сверхпроводящее состояние при температуре 91 К, то есть температуре выше азотной. Критическая плотность тока при температуре 77 К (жидкий азот) находится на уровне 1100 А/см². Была открыта эра так называемых "азотных" сверхпроводников. Японцы исследовали большое число соединений с общей формулой $M Ba_2Cu_3O_{7-x}$, где М-элемент в качестве которого брались скандий, эрбий, гольмий, диспрозий, иттерий, иттрий, европий. Для изученных систем критическая температура перехода лежала в пределах 83-93 К, что дало основание считать не критичным выбор того или иного редкоземельного элемента: определяющее значение имеют по мнению большинства исследователей цепи меди и кислорода.

1988 год ознаменовался открытием новых высокотемпературных сверхпроводников без редкоземельных элементов [66] . Система Tl-Ba-Ca-Si-O с $T_K = 122$ К дает эффект Мейснера (эффект выталкивания магнитного поля

из сверхпроводника - идеальный диамагнетизм; второй после нулевого электросопротивления признак сверхпроводимости) вдвое меньший, чем лучшие образцы $Y-Ba-Cu-O$. К этой категории относится и система $Bi-Sr-Ca-Cu-O$ с $T_K = 105$ К.

В настоящее время для изготовления высокотемпературного сверхпроводника используется порошковая технология, технология выращивания поли-, моно- и нанокристаллов, а также технология напыления пленок на гибкую металлическую ленту-подложку.

Так, фирмой IBM США производилось напыление компонентов иттриевой керамики на подложки из сапфира, MgO , $BaTiO_3$. Толщина пленок изменялась от 0,1 до 1 мкм, $T_K \approx 97$ К, $j_c = 300$ А/см². Фирмой Siemens опробованы подложки из $SrTiO_3$, ZrO_2 , Al_2O_3 и ВТСП $Y-Ba-Cu-O$. Лучшие результаты $T_K = 88$ К, $j_c (T = 77$ К, $B = 0$ Тл) = 10^4 А/см² [67].

Работы в области получения пленочных ВТСП привлекательны тем, что они имеют непосредственный выход на создание проводов для сверхпроводящих магнитных систем. Так, в [68] описано изготовление длинных сверхпроводящих лент с плазменным напылением порошка $Y-Ba-Cu-O$ на подложку из никелевого сплава. При оптимальных условиях получен однородный сверхпроводник длиной более 10 м с критической температурой $T_K \approx 88$ К. Лента сохраняла сверхпроводящие свойства при 78 К после намотки на цилиндр с радиусом кривизны до 60 мм. В системе $Bi-Sr-Cu-O$ подобным образом удалось получить ленту с окончательной критической температурой $T_K = 50$ К. Авторами [69] описано изготовление толстых сверхпроводящих пленок из $Y-Ba-Cu-O$ методом спекания и быстрой закалки в вальках. Толщина пленки варьировалась от 10 до 500 мкм. Лента толщиной 50 мкм, шириной 13 мм, длиной 45 мм имеет плотность $6,48$ Г/см³, $T_K = 92,6$ К, $j_K = 1,3$ А/см².

Другим возможным направлением изготовления проводов из ВТСП является технология заполнения металлических трубок из материала с высокой электрической проводимостью медь, серебро предварительно обработанным порошкообразным материалом с последующим его спеканием и вытягиванием трубки до нужного размера, сопровождающееся окончатель-

ной термообработкой. По такой технологии во ВНИИП изготовлены провода: круглый диаметром 1 мм в медной оболочке с диффузионным барьером, круглый диаметром 0,55 мм в оболочке из серебра, прямоугольного сечения 3,5x0,4 мм и 4x1,5 мм в медной оболочке. Температура перехода в сверхпроводящее состояние. $T_K \sim (90 \pm 95) \text{ K}$, плотность критического тока в собственном магнитном поле 10^2 A/cm^2 .

Исследователи фирмы Siemens [67] получили сверхпроводящий провод с 15 волокнами в серебрянной матрице по порошковой технологии. В одноволоконном проводе $J_c (T = 77 \text{ K и } B = 0) - 800 \text{ A/cm}^2$, и на два порядка падает при $B = 1 \text{ T}_d$.

В [70] представлены результаты технологии создания проводов из керамических ВТСП с использованием экономичных, хорошо развитых "текстильных" методов. Экструдированы волокна из $Y-Ba-Cu-O$. В качестве заготовки использовали ВТСП, изготовленный по обычной керамической технологии. Для получения волокон размолотый в порошок ВТСП помещали в водный раствор и добавляли к водному раствору ПВА, содержащему диспергент. Суспензию экструдировали в виде волокон в специальную среду, представляющую собой смесь водных растворов $NaOH$ и Na_2SO_4 при ЗВК, и спиннинговали на барабане, вращающемся с окружной скоростью 1 м/с. В другом варианте технологии порошок помещали в безводный диметил-сульфоксидный раствор ПВА, содержащий диспергент. Волокно экструдировали в метиловый спирт, спиннинговали и высушивали. Получены волокна диаметром $\sim 80 \text{ мкм}$ (при водном варианте технологии) и 150 мкм (при безводном). T_K волокон составляет 82 К. Образцы, приготовленные из безводных суспензий, имели $I_K = 680 \text{ A/cm}^2$ при $T = 77 \text{ K}$, а образец, приготовленный из водных суспензий 230 A/cm^2 . Волокна имели удовлетворительные механические свойства: относительное удлинение 1-2%, предел прочности 16-37 МПа.

Резюмируя изложенное выше, можно отметить следующее:

- найдена группа керамических материалов, обладающих сверхпроводимостью при температуре, превышающей температуру кипения азота, так

называемые "азотные" сверхпроводники;

- применению их в технике пока препятствует их низкая токонесущая способность;

- проводятся интенсивные исследования новых сверхпроводников и разрабатывается технология получения проводниковых материалов на их основе, которые можно будет использовать в сверхпроводящих устройствах различного назначения.

Не смотря на то, что широкое внедрение новых сверхпроводников потребует длительного времени, огромных усилий и затрат, не исключено, что "азотные" сверхпроводники будут применены в технике очень скоро. Для ОТС же нужны "комнатно-температурные" сверхпроводники. На вопрос, можно-ли их создать, В.Л.Гинзбург ответил так: "Не вижу особых оснований в этом сомневаться... Правда должен признать, что серьезных оснований для этого нет, появилась лишь большая уверенность, обусловленная открытием "азотных" сверхпроводников" [64].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в настоящей работе силовые и энергетические характеристики ТДС ротора общепланетного транспортного средства со сверхпроводящей обмоткой возбуждения при изменении его скорости в диапазоне $0 - 10^4$ м/с, массе 100 кг/м, максимальном размере поперечного сечения - 0,3 м и потребляемой мощности 10 кВт/м, позволяют прийти к выводу о правомерности такого технического решения в принципе. Однако, реальностью это решение может стать только при условии создания "комнатно-температурных" сверхпроводников, находящихся по электро-физическим, весовым и стоимостным показателям на уровне современных низко-температурных сверхпроводников.

Даже при выполнении этого условия создание общепланетного транспортного средства с электродинамическим подвесом и двигателем постоянного тока с тиристорным коммутатором будет связано с рядом проблем разного уровня. Это: проблема повышения к.п.д. двигателя, проблема надежности и устойчивости энергообеспечения общепланетного транспортного средства при разгоне его ротора, проблема утилизации сверхпроводящих обмоток возбуждения в космосе или возвращение их и вакуумной оболочки с катушками подвеса на землю для повторных запусков общепланетного транспортного средства и пр.

Перечень такого рода проблем можно было бы продолжить. Большинство из них потребует для своего решения значительных усилий, времени и средств. Если взять, например, проблему повышения к.п.д. двигателя, то она может быть решена только при условии достижения качественно нового уровня полупроводниковой техники. Если удастся создать тиристоры с временем коммутации 10^{-6} с, то полюсное деление обмоток двигателя можно выбрать на уровне 5 м и при этом довести его к.п.д. до 45%.

Вместе с тем, существует ряд вопросов, в основном теоретического плана, предпосылки для решения которых имеются уже сегодня. Так, задача анализа конструкции предложенной схемы ТЛС решалась нами при произвольных, интуитивно выбранных соотношениях геометрических параметров катушек и зазоров между статором и ротором. Поэтому полученные оценки потерь мощности в системе подвеса (100-250 Вт/м) и к.п.д. тягового двигателя (10%) являются ориентировочными и не дают точного представления о возможностях системы. Не вызывает сомнений, что при решении задачи оптимизации конструкции ТЛС могут быть найдены более приемлимые значения и для мощности потерь и для к.п.д.

В целом, работы над проектом общепланетного транспортного средства представляются безусловно полезными и нужными. В процессе технической реализации идеи бесконтактного подвеса и тяги ротора, движущегося с гиперскоростями, помимо достижения основной цели - создания средства безракетной индустриализации космоса, могут быть получены принципиально новые экологически чистые технологии, поднимающие на качественно новый уровень энергетику и транспорт.

Список литературы

1. Юницкий А.Э. / В космос - без ракеты // Техника и наука.- 1987.- № 4.- С.40-43.
2. Polgreen G.R. / Railways with magnetic suspension // *The Engineer*, vol. 226, p. 632-636, Oct. 25, 1968.
3. Высокоскоростной наземный транспорт с линейным приводом и магнитным подвесом / Под редакцией В.И.Бочарова.- М.- 1985.- 280 с.
4. Патент 3589300 США, МКМ В01 13/08.
Magnetic suspension system / Stefan L.Wipf.
5. Boldea I. / Static and dynamic performance of electrodynamic (repulsion) levitation systems (EDS) // *Elec. Mach. and Electromech* - 1981. - v 6 - N1, - p. 45 - 55
6. Atherton D.L., Eastham A.R., Tedford R.E. / Joints in Strips for Electrodynamic Magnetic Levitation Systems // *IEEE Trans. Magnetics* - 1978. - vol. 14. - N2. - p. 69-75.
7. Powell J.R., Danby G.R. / A 300-mph magnetically suspended train // *Mechanical Engineering*. - nov. 1967. - p. 30-35
8. Powell J.R., Danby G.T. / Integrated Magnetic Suspension and Propulsion Systems // *IEEE Conf. Rec. 7th Annual Meet. IEEE Incl. Appl. Soc., Philadelphia, Pa, 1972.* - p. 517-526
9. Патент 3470828, МКМ В61В 13/08. Electromagnetic inductive suspension and stabilization system for a ground vehicle.
10. Сика В.К. / Средние значения индукции поля возбуждения линейного синхронного двигателя без ферромагнитного магнитопровода // *Бесконтактные электрические машины*. - 1981. - вып.20. - С.3-14.
11. Powell J.R., Danby G.T. // *Cryogenics and Industrial Gases*. - oct. 1969. - p. 19-24.
12. Комбинированные системы синхронной тяги и направления для высокоскоростного наземного транспорта / Л.П.Елисеев, В.И.Матин, К.И.Ким // *Высокоскоростной наземный транспорт, Межвузовский сборник.* - Новочеркасск: изд. НПИ. - 1979. - 176 с.
13. Патент 3913493 США, МКМ В61В 13/08. System for propelling train by linear synchronous motor / N. Maki
14. Hayes W.F., Fucker H.G. / Design Concept and Comparative Performance of an Electrodynamic Maglev Transportation System for the Toronto-Montreal Corridor of Canada // *Int. Conf. Maglev Transport Now and for Future*, 9-10 Oct. 1984, p. 137-148
15. Полигон для исследования линейных транспортных двигателей / А.В.Ершчан и др. // *Труды МИИТа.* - 1985. - № 782. - С.97-99.

16. Takahashi T., Maki N., Miyashita T. / Combined system for propulsion and guidance of magnetically suspended vehicles // Proc. 5th Int. Cryog. Conf., Kyoto, 1974. - p. 78-81
17. А.с. 624807 (СССР) / Путевое устройство для высокоскоростного наземного транспорта с электродинамическим подвесом и линейным синхронным двигателем // Открытия. Изобретения. Пром. образцы. товар. знаки. - 1978. - № 35. - С. 50.
18. Куркалов И.И. / Силы подъема и тяги линейного синхронного двигателя с массивными проводниками обмотки статора // Бесконтактные электрические машины. - 1984. - вып. 23. - С. 101-110.
19. А.с. 1121872 (СССР) / Устройство магнитной электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства // В.И. Омеляненко, С.А. Сергеев, В.Ф. Волух.
20. А.с. 1389171 (СССР) / Устройство электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства // В.И. Омеляненко, С.А. Сергеев, В.Ф. Волух.
21. Reitz J.R., Bocchests R.H. / U.S. Department of transportation program in magnetic suspension (repulsion concept) // IEEE Trans. Magnetics. - 1975. - vol. 11. - № 2. - p. 615-618
22. IEEE Trans Magnetics - 1974. - vol. 10 - № 3. - p. 451-457

23. Thornton R.D., Iwasa Y, and Kolm H.H. / The magneplane system // Proc 5th Int. Cryog. Eng. Conf., Kyoto. - 1974. - p. 42-45

24. Пауэлл / Крупномасштабные применения сверхпроводимости // Сверхпроводящие машины и устройства. - М.: Мир, 1977. - 763 с.
25. Hazy D. Fair / Electromagnetic Propulsion: A New Initiative // IEEE Trans. Magnetics. - 1982. - vol. 18. - № 1. - p. 4-6
26. Kolm H., Mongeau P. / Basic principles of coaxial launch technology // IEEE Trans. Magnetics - 1984. - vol. 20. - № 2. - p. 227-230
27. Snow W., Dunbar S. / Mass Driver Two: A status report // IEEE Trans Magnetics. - 1982. - vol. 18 - № 1. - p. 127-134
28. Mongeau P. / Analysis of helical brush commutation // IEEE Trans Magnetics. - 1984. - vol. 20 - № 2. - p. 231-234
29. Kolm H., Mongeau P., Williams F. / Electromagnetic Launchers // IEEE Trans. Magnetics. - 1980. - v. 16. - № 5. - p. 719-721
30. O'Neill G.K. / The colonization of space // Physics Today. - 1974. - v. 27. - № 9. - p. 32-40

31. O'Neill G.K., Snow W.R. / Overview and Outline of Mass-Drive Two // AIAA paper N 79-1396
32. Mass Drive Two: Cryogenic Module / K. Finl et al. // AIAA Paper N 79-1398
33. Snow W.R., O'Neil G.K. / Construction and Testing of the 2,5 m Mass Drive // AIAA paper N 79-2095
34. Bezkopec F.D., Stone J.R., Aston G. / NASA Electric Propulsion Technology // AIAA Paper N 85-1999
35. Essential Technics in MACLEV Transportation. - Quarterly Reports of Railway Technical Research Institute. - 1984. - vol. 25. - n1. - p. 13-18
36. Ивабана Б. / Исследование перехода к U-образной форме полотна на испытательной линии в г. Миядзаски // Тэцудо гидзюцу кэнкю сире. - 1983. - т. 40. - № 12. - С. 450-454.
37. Yasukochi K. / Superconducting Magnet development in Japan // IEEE Trans Magnetics. - 1983. - vol. 19. - n3. - p. 179-188
38. Sasaki M. / Development of the Magnetically Levitated Train // Japanese Railway Engineering. - 1983. - vol. 22. - n4. - p. 20-24
39. Masada E. et al / Present Status of Maglev Development in Japan and HSST-03 Project // Int. Conf. Maglev Transport Now and for Future, 9-10 Oct, 1984.
40. Lang A., Wen H., May H. / Braunschweig Elektrodynamisches Tragsystem mit endlich breiter Schiene // Archiv für Elektrotechnik. - 1975. - Jg. 57. - s. 223 - 233
41. Oberzette K. / Vergleich elektrodynamischer Schweißsysteme // Elektrotechnische Zeitschrift A. - 1975. - Jg. 96. - H. 9. - s. 391-394
42. Kratki N., Oberzette K. // Archiv für Elektrotechnik. - 1975. - Bd. 57. - H. 2. - s. 59-64
43. Albrecht C. / Elektrodynamische Trag-Führungs-Systeme // Elektrotechnische Zeitschrift A. - 1975. - Bd. 96. - H. 9. - s. 383-390
44. Bogner G. / Applied Superconductivity Activities at Siemens // IEEE Trans Magnetics. - 1979. - vol. 15. - n1. - p. 824-827
45. Rhodes G., Mulhall B.E. / The Wolfson magnetic levitation project // Cryogenics - July 1975. - p. 403-405
46. Atherton A.L., Eastham A.R. / Canadian developments in superconducting Maglev and linear synchronous motors // Cryogenics - July 1975. - p. 395-401
47. Design, analysis and test results for a superconducting linear synchronous motor / D.L. Atherton et al. // Proc. IEE - 1977. - vol. 124. - n4. - p. 363-372
48. Propelling passengers faster than a speeding Bullet / H. Alsheer et al. // IEEE Spectrum. - August 1984. - p. 57-64

49. Performance and stability characteristics of an electrody-
namically levitated vehicle over a split guideway / J. Y. Wong
et al. // Proc. 4th Annual Intersac. Conf. on Transportation,
July 18-23, 1976. - p. 1-6.
50. Mahtani J. L., Rhodes R. G. / Electrodynamic force characteristics
of the split-track Maglev System // Journal de Physique. - 1984. - т. 45.
n1. - p. C1-747 - C1-751
51. Кетани Е. / Современное состояние поездов на сверхпроводящей
магнитной подвеске // Китай-но кэнкю. - 1982. - т. 84. - С. 337-342.
52. Сверхпроводящие соленоиды для подвеса высокоскоростных наземных
транспортных средств / Омельяненко В. И. и др. // Изв. вузов. Электр
механика. - 1977. - № 8. - С. 875-878.
53. Бочаров В. И., Салли И. В., Дзензерский В. А. Транспорт на сверх-
проводящих магнитах. - Изд.-во Ростовского университета. - 1988. - 152
54. Метод расчета сил подъема и торможения электродинамического
подвеса / В. И. Омельяненко и др. // Изв. вузов. Электромеханика. - 1977.
№ 8. - С. 865-870.
55. Бахвалов Ю. А., Бурцев В. А. / Расчет силовых взаимодействий в си-
стеме электродинамического подвеса и направления высокоскоростного
наземного транспорта с дискретной путевой структурой // Изв. вузов.
Электромеханика. - 1979. - № II.
56. Астахов В. И., Бондаренко М. Е. / Влияние профиля проводника на си-
ловые характеристики при движении источника магнитного поля // Изв.
вузов. Электромеханика. - 1984. - вып. II. - С. 8-12.
57. Влияние формы токового контура на силовые характеристики подде-
ромоторного взаимодействия / М. Е. Бондаренко и др. // Изв. вузов.
Электромеханика. - 1986. - № 6. - С. 18-21.
58. Takano I., Saito Y., Ogiwara H. / End effect of a Magnetically Suspended
Ultra High Speed Train // Electrical Engineering in Japan. - 1975. - vol. 95. -
n1. - p. 59-65
59. Takano I., Saito Y., Ogiwara H. / Design and Comparison of Ultrahigh
Speed Ground Transportation Systems // Electrical Engineering in Japan. -
1975. - vol. 95. - n2. - p. 26-33.
60. Nonaka S., Sakamoto T. / End Effect of Superconducting Magnetic
Levitation System with U-shaped Guideway // Technol. Repts Kyushu
Univ. - 1984. - v. 57. - n3. - p. 201-208.
61. Borcherts R. H. / Repulsion magnetic suspension research - US progress to
date // Cryogenics. - July 1975. - p. 385-393.
62. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная
книга. М.: 1986. 488 с.
63. Черноплеков Н. А. / Современное состояние проблемы сильноточной
технической сверхпроводимости // Вестник АН СССР. - 1987. - № II. - С.

64. Гинзбург В.А. / Высокотемпературная сверхпроводимость // Вестник АН СССР.- 1987.- № II.- С.20-27.
65. Фишер Л.М., Петровский Ю.В. / Высокотемпературная сверхпроводимость: успехи и перспективы // Электротехника.- 1987.- № II.- С.59-62.
66. Maeda Hiroshi / New High- T_c superconductors without rare earth elements // *Physica*, - 1988.- Pt.1.- P.602-607
67. Status of HTS activities at Siemens / Hoenig H.E. et al. // *Physica*, - 1988.- c.153-155, Pt.2.- c.1433-1434.
68. Konaka T. / Plasma sprayed high- T_c oxide superconductors // ECAPD-1 and ISAF'88, Zürich, Aug. 29-Sept.1, 1988.- c.46
69. Takahashi Koichiro / Firing process of superconductive $YBa_2Cu_3O_7$ thick films by rapid-quenching // *Physica*, - 1988.- c.153-155, Pt.1.- c.385-386
70. Critical current density of the Y-Ba-Cu-O superconducting filament produced by suspension spinning method / Coto T., Horiba I., et al // *Physica*, - 1988.- c.153-155, Pt.1.- c.800-801

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Некоторые замечания относительно тенденций изменения массо-габаритных и энергетических характеристик ТЛС ротора ОТС при изменении его удельной массы ниже 100кг/м

Как уже указывалось ранее, выполненные в настоящей работе расчеты имеют приближенный характер и не претендуют на высокую точность, особенно в оценке каких-либо критериев по абсолютной величине. Тем не менее, мы верим, что полученные зависимости в целом верно прогнозируют динамику изменения характеристик ТЛС ротора ОТС в заданном диапазоне скоростей. В основной части мы рассмотрели случай удельной массы ротора 100 кг/м, целью же данного раздела является уточнение рабочих характеристик ТЛС при массе погонного метра ротора менее 100 кг.

Итак, возвращаемся на стр. 122. Здесь приведены геометрические параметры якорных катушек системы подвеса. Поскольку нашей текущей задачей является исследование влияния именно удельной массы ротора, считаем, что якорная часть устройства остается прежней. Неизменными оставляем и требования к зазорам между ротором и статором (стр. 123)

Стр. 126 - при оценке минимально допустимой величины МДС СПОВ получаем (с учетом того, что $\hat{F}_2 = M^*(g - \frac{2V_{\max}^2}{D})$), что

$$I_{s \min} \approx \sqrt{\frac{0,6 M^* g}{A_1}}, \text{ т.е. } I_s \sim \sqrt{M^*}. \quad (1)$$

В то же время, в соответствии с (4.11) мощность потерь в путевых контурах подвески P_g пропорциональна квадрату МДС СПОВ, а поэтому линейно зависит от массы ротора:

$$P_g \sim M^*. \quad (2)$$

Таким образом, с уменьшением удельной массы ротора потери в системе подвеса снижаются пропорционально массе ротора в первой степени, а МДС СПОВ - пропорционально массе в степени 1/2.

Таблица I

Удельная масса ротора кг/м	Требуемая кА	МДС СПОВ	Максимальные потери в системе подвеса, не более Вт/м
100	120		1000
50	85		500
10	40		100
1	12		10

Вместе с тем, следует иметь в виду, что по мере уменьшения интегральной массы ротора процентный вклад массы СПОВ в этот параметр непрерывно увеличивается. Действительно, полагая, что плотность тока в СПОВ не зависит от величины ее МДС, будем считать, что масса собственно сверхпроводящей катушки M_{sc}^* пропорциональна ее МДС в первой степени. Тогда

$$M_{sc}^* \sim \bar{I}_s \sim \sqrt{M^*},$$

$$a \quad \frac{M_{sc}^*}{M^*} \sim \frac{\sqrt{M^*}}{M^*} \sim \frac{1}{\sqrt{M^*}}. \quad (3)$$

Очевидно, что в этом отношении большой практический интерес представляет собой случай с "тяжелым" ротором. Кроме того, в случае варианта "легкого" ротора в его конструкции должна быть предусмотрена тепловая изоляция, предохраняющая ротор от теплового удара при выходе из вакуумного канала статора в атмосферу.

Коэффициент полезного действия двигателя. Известно, что КПД определяется как

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{эл}}, \quad (4)$$

где $P_{эл}$ - электрические потери в обмотке якоря;

P_2 - мощность, которую расходует двигатель на разгон ротора ОТС.

$$P_{эл} = I_я^2 R. \quad (5)$$

В свою очередь

$$I_я = \frac{P_2}{\eta \cdot U} \quad (6)$$

При подстановке (5) и (6) в (4) получаем уравнение вида

$$\eta^2 - \eta + \frac{P_2 \cdot R}{U^2} = 0 \quad (7)$$

с решением:

$$\eta_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{D_i}}{2}, \quad (8)$$

где $D_i = 1 - 4 \cdot \frac{P_2 \cdot R}{U^2}$ - дискриминант

Для нагрузки $P_2 = 2 \times 10^{10}$ Вт (вариант, рассмотренный в главе 5) корни уравнения следующие: $\eta_1 = 0,1$ и $\eta_2 = 0,9$. Физическим является первое решение, поскольку корректный результат получается при подстановке в уравнение напряжения якоря двигателя тока, соответствующего именно этому решению.

При скоростях ротора 10^5 м/с и $\tilde{\tau} \gg \ell$ КПД достигает своего максимума (50%), когда $D_i = 0$. При неизменном напряжении питания максимум КПД для двигателя с параметрами, приведенными в главе 5 может быть достигнут при сопротивлении обмотки якоря $1,62 \times 10^{-4}$ Ом.

Таблица 2

Варианты исполнения	1	2	3
Параметры			
Масса ротора, кг/м	100	100	50
Мощность, развиваемая двигателем Вт/м	1×10^3	1×10^3	$0,5 \times 10^3$
КПД двигателя, %	10	50	50
Расход материалов (кг/м) стоимость (руб./м):			
Медь	42/80	15/29	7,5/15
СтЭФ	200/1120	200/1120	200/1120
Сверхпроводник	10/550	50/2750	100/5500
Тиристоры (шт./м)	2,5/2500	0,5/500	0,25/250
Стоимость, (руб./м)	4250	4400	6885

Чтобы сохранить тягово-левитационные характеристики на требуемом уровне, необходимо либо в пять раз увеличить массу СПОВ с прежними электрофизическими параметрами провода, либо, оставив неизменной ее массу, создать сверхпроводник с электрофизическими параметрами, в пять раз превышающими существующие на сегодняшний день сверхпроводники.

Задача исследования влияния уменьшения удельной массы ротора на КПД двигателя сводится к исследованию влияния на КПД мощности P_2 . При рассчитанных ранее электромагнитных и геометрических параметрах двигателя уменьшение P_2 вызовет увеличение дискриминанта D_i в выражении (8) и как следствие - снижение КПД. Этот факт соответствует положениям общей теории электрических машин, когда уменьшение нагрузки сопровождается снижением КПД.

Нахождение максимального значения КПД при произвольной удельной массе ротора сводится к выбору определенных соотношений между P_2 , R и U , удовлетворяющих условию

$$U = \frac{N}{4a_p \gamma} \cdot \frac{P_2}{A_s} + \bar{I}_я R. \quad (10)$$

Для решения этой многомерной задачи многокритериальной оптимизации необходимо использовать методы нелинейного программирования.