

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ РАЗГОНА РОТОРА ОТС

Данная глава содержит постановку задачи о создании комбинированной тягово-левитационной системы ОТС, осуществляющей подвес ротора внутри вакуумной оболочки и его бесконтактный разгон до космических скоростей. Более подробное изложение этих вопросов содержится в отчетах [III, IV].

Исследована динамика разгона ротора, рассматриваемого на первом этапе как жесткое тонкое кольцо, с учетом действия тяговых усилий, изменяющихся обратно пропорционально скорости ротора. Рассмотрена постановка задачи о движении ротора при действии определенного типа возмущающих факторов [VI].

4.1. Система подъема ротора в центр оболочки

Ускорению ротора относительно эстакады предшествуют подъем или левитация ротора до положения центральной линии вакуумной оболочки. Система подъема, если ограничиваться случаем экваториального расположения ОТС, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Левитация ротора должна происходить бесконтактно, что можно достигнуть с помощью взаимодействия магнитных полей с электрическими токами.

2. Левитация должна иметь неколебательный характер, в крайнем случае — характер быстрозатухающих колебаний. Конечное положение — коаксиально в центре оболочки, с зазором между ротором и оболочкой около 0,1 м.

3. Силовые и другие параметры магнитного подвеса в расчете на 1 м длины ротора должны быть такими, чтобы преодолеть и затем уравновесить вес элемента ротора такой же длины. Упругая сила растяжения устраняется путем создания люфтов в телескопических соединениях фрагментов.

4. В процессе разгона ротора вес его элементов уменьшается — как равнодействующая силы тяготения и центробежной силы, направленных вдоль радиуса в противоположные стороны. Соответственно

должна уменьшаться сила магнитного давления на ротор, следовательно, обязательна обратная связь между линейной скоростью ротора и силой магнитного давления или между изменением зазора и магнитной силой.

5. В момент достижения первой комической скорости V_1 равнодействующая силы тяготения и центробежной силы каждого элемента ротора обращается в нуль (состояние невесомости), а затем, при увеличении скорости, меняет направление. Аналогично этому, и сила магнитного давления должна изменить свое направление, удерживая ротор от расширения. При достижении расчетной скорости $V_0 > V_1$ эта сила имеет значение

$$N = \frac{m_p V_0^2}{R} - m_p g = \frac{m_p}{R} (V_0^2 - V_1^2),$$

где m_p — масса элемента ротора, R — радиус экватора, g — гравитационное ускорение на экваторе, $V_1 = (gR)^{1/2}$.

6. После начала радиального движения (второй этап) система подвеса должна удерживать оболочку на расширяющемся роторе с сохранением зазора между ними без подвода энергии от внешних источников.

Известны системы магнитной левитации трех типов:

1. Подвес с помощью магнитов.
2. Электромагнитный подвес.
3. Электродинамический подвес.

Возможны также различные сочетания этих трех основных типов.

Подвес с помощью постоянных магнитов использует силу отталкивания одноименных полюсов магнитов. Для этой цели на наружной поверхности ротора и внутренней поверхности оболочки устанавливаются четыре пары магнитов: две — для вертикальной левитации и две — для горизонтальной стабилизации.

Характеристики имеющихся магнитов с учетом их размеров применительно к поперечным размерам ротора и оболочки недостаточны для получения необходимых при подвесе ротора параметров, в частности, силы давления на единицу массы ротора. Этот недостаток устраняется тем обстоятельством, что на этапе движения со скоростью $V < V_1$ вся нагрузка от веса ротора передается только нижним магнитам; к силам тяжести добавляется магнитная сила давления от верхних магнитов. После достижения скорости V_1 картина меняется — основная нагрузка передается верхним магнитам. В обоих случаях нагрузки

воспринимаются вакуумной оболочкой, обеспечение прочности которой приводит к значительному увеличению ее массы. Существенные трудности создает также высокая удельная плотность материала постоянных магнитов и, следовательно, их большая относительная масса.

Использование сил притяжения разноименных полюсов вообще невозможно, т.к. такая система принципиально неустойчива: при увеличении зазора сила притяжения падает, а при уменьшении — растет; в том и другом случаях это может привести к нарушению бесконтактности. Чтобы предотвратить такую ситуацию, необходимо управлять силой магнитов, но для постоянных магнитов это невозможно.

Таким образом, постоянные магниты не удовлетворяют требованиям, необходимым для обеспечения бесконтактного подвеса ротора внутри оболочки на всех этапах разгона и подъема в плотной атмосфере.

К выводу о нецелесообразности применения постоянных магнитов пришли и разработчики высокоскоростного наземного транспорта на магнитной подушке, т.е. при решении более простой технической задачи, с намного меньшими скоростями движения и массовыми параметрами.

Электромагнитный подвес основан на использовании сил притяжения электромагнитов с ферромагнетиками. Для этого ротор ОТС должен содержать элементы из ферромагнитного материала, а электромагниты располагаются на оболочке. Размещение электромагнитов на роторе нецелесообразно, т.к. при этом возникает проблема подачи к ним электроэнергии.

При перемещении ферромагнетика относительно электромагнитов в нем наводятся вихревые токи, создающие магнитный поток, созданный электромагнитами. Возникающая при этом сила может быть разложена на тормозную, направленную против направления движения ротора, и отталкивающую, направленную против левитирующей силы подвеса. С ростом скорости движения ротора влияние вихревых потоков может быть существенно, поэтому необходимы меры для компенсации указанных сил. Компенсация отталкивающей силы осуществляется системой управления путем значительного увеличения тока в обмотке электромагнитов, а тормозной силы — увеличением тягового усилия линейного двигателя.

Применению электромагнитного подвеса для левитации ротора ОТС препятствуют малая величина зазора и нестабильность подвеса. Магнитная сила возрастает с уменьшением зазора и уменьшается при его увеличении. Таким образом, система с притяжением, как уже отмечалось, нестабильна, она имеет "отрицательный" коэффициент упругости и для ее стабилизации необходимо применять механизм об-

ратной связи, регулирующий ток магнита, затрачивая при этом значительную энергию.

Электродинамический подвес основан на использовании правила Ленца, согласно которому 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 возникают силы отталкивания. Система с отталкиванием устойчива относительно смещений, т.к. силы отталкивания возрастают с уменьшением зазора между элементами системы.

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

При разработке системы отталкивания возникает проблема диссипации энергии вследствие конечной проводимости проводника контура. Как и индукционный нагрев, эта диссипация зависит от частоты изменения поля, достигая максимума на определенной частоте и уменьшаясь до нуля на высоких частотах.

Система с отталкиванием целесообразна для применения в ОТС, т.к. позволяет использовать сверхпроводящие магниты для генерирования необходимого магнитного поля. С помощью таких магнитов создается сильное магнитное поле в большом объеме, что решающим образом влияет на всю конструкцию системы.

Электродинамическая система подвеса в ОТС имеет простую схему. На роторе, движущемся относительно оболочки, размещены в ряд сверхпроводящие магниты, а на оболочке расположены контура из диамагнитного материала. Создаваемое магнитное поле постоянно по отношению к ротору, но переменное по отношению к оболочке и контурам. В результате возникает сила отталкивания, которая удерживает ротор относительно оболочки. Но если ротор неподвижен, то подъемная сила равна нулю, поэтому в начале движения должна действовать другая, "стационарная" система подвеса.

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

1. Зазор между магнитами и контурами может быть на порядок больше, что имеет принципиальное значение при высоких скоростях.
2. Сильное магнитное поле, создаваемое в большом объеме, можно использовать не только для подвеса, но и для приведения в движение ротора ОТС, т.е. совместить механизмы подвеса и разгона ротора.

Последнее обстоятельство очень важно, т.к. резко упрощается вся

тягово-левитационная система (ТЛС) ускорителя ОТС, уменьшается расход электропроводящих материалов, энергии и т.д.

С электродинамическим подвесом связаны, однако, две проблемы: необходимость дополнительного типа подвеса при малых скоростях и криообеспечение сверхпроводящих магнитов. Вторую проблему можно решать, используя высокотемпературную сверхпроводимость.

4.2 Проблемы создания линейного электродвигателя для разгона ротора до космических скоростей

Электродвигатель для привода ротора в движение относительно эстакады должен удовлетворять следующим основным требованиям [III]:

1. Питание электродвигателя осуществляется от некоторого числа электростанций, включенных параллельно, с одинаковой частотой тока, с заданной суммарной мощностью.

2. Исключается передача электроэнергии на ротор в период его разгона.

3. Электродвигатель должен обеспечить надлежащую величину пускового усилия и требуемые усилия для достижения необходимой скорости вращательного движения ротора за приемлемый промежуток времени — несколько суток.

4. Конструктивная схема электродвигателя обеспечивает его многофункциональность:

4.1. Электродвигатель служит ускорителем ротора ОТС.

4.2. Электродвигатель является частью электродинамической системы левитации ротора, обеспечивая в сочетании с другими типами подвеса его бесконтактный подвес относительно оболочки, включая этап движения ротора с оболочкой в плотной атмосфере.

4.3. После выхода ротора на орбиту элементы ТСЛ должны использоваться для создания энергетических и, особенно, транспортных систем как в пределах данного промышленного кольца на основе ротора, так и между данным и другими кольцами космической промышленной зоны.

4.4. ТСЛ должна быть оптимальной с смысле потерь энергии и расхода материалов.

Эти разноплановые требования могут быть удовлетворены путем рациональных компромиссов при решении многокритериальной оптимизационной задачи.

Ниже кратко рассмотрены особенности и возможности удовлетво-

рения указанным требованиям трех основных типов двигателя: асинхронного, синхронного и коммутаторного на постоянном токе.

В схеме асинхронного двигателя для приведения в движение ротора ОТС статор, включающий сердечник с многофазной обмоткой, закрепляется на оболочке.

На роторе устанавливается вторичная обмотка, выполненная либо в виде шины из металла с высокой электрической проводимостью, либо в виде замкнутых по торцам проводников.

Сила, действующая на обмотку ротора, может создаваться лишь в том случае, если скорость его перемещения меньше скорости перемещения волны магнитной движущей силы. Таким образом, при увеличении скорости ротора должна увеличиваться и скорость волны, что можно достигнуть, увеличивая частоту питающего напряжения. Синхронизация для этой цели большого числа параллельно работающих преобразователей частоты весьма сложна.

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 приводимого в движение ротора. Выделение энергии в первичной цепи обычно несколько больше, чем во вторичной, что может привести к перегреву двигателя. Поэтому прямой пуск невозможен и следует применять пуск при пониженном напряжении. Общий КПД двигателя невелик, достигая 0,2—0,25.

Требования 2 и 3 недостижимы при использовании асинхронного двигателя. Безоговорочно выполняется лишь требование 2 об исключении передачи электроэнергии на ротор гальваническим путем.

Таким образом, особенности схемы и работы асинхронного двигателя вряд ли позволяют использовать его в качестве двигателя для ротора ОТС.

В схеме синхронного двигателя для ускорения ротора многофазная обмотка закреплена на оболочке, а обмотка возбуждения индуктора — на роторе. Обмотка возбуждения при этом — сверхпроводящая, работающая в режиме замороженного потока, поэтому нет необходимости передавать электрическую энергию на ротор после запитки обмотки и ее закорачивания.

Пусковые свойства синхронного двигателя требуют регулирования частоты подводимого к обмотке якоря тока от нулевых значений до номинальных, однако проблема регулирования, особенно в диапазоне низких частот, в настоящее время не решена.

С другой стороны, применение сверхпроводящей обмотки возбуждения индуктора позволяет отказаться от ферромагнитного сердечника на якоре, поэтому расположенные на оболочке обмотки и про-

водящие элементы можно комбинировать так, чтобы они, помимо тяги, обеспечивали и функции системы электродинамического подвеса. При этом КПД синхронного двигателя значительно выше. Таким образом, существенным препятствием при использовании синхронного двигателя для ускорения ротора ОТС является лишь проблема пуска и регулирования частоты питающего тока.

Схема коммутаторного двигателя аналогична схеме синхронного: сверхпроводящая обмотка индуктора, работающего в режиме замороженного потока, фиксируется на роторе, а обмотка якоря закреплена на оболочке. Секции обмотки якоря питаются от сети переменного тока, работающей на выпрямителе, через тиристорный коммутатор. Его назначение — переключать секции обмотки якоря по сигналам от специальных датчиков в зависимости от расположения полюсов индуктора. В результате возникает сила тяги постоянного направления, зависящая от подаваемого на обмотку якоря напряжения, что намного упрощает проблемы пуска и регулирования скорости ротора. КПД такого двигателя выше, чем у синхронного; выполняются также пункты 1, 2 требования многофункциональности, т.е. помимо ускорения, он может выполнять также функцию левитации ротора.

В отчете [IV] предпочитается асинхронный двигатель без использования сверхпроводимости, но при этом только в качестве ускорителя ротора; КПД такого двигателя может быть доведен до 0,9.

Таким образом, из трех систем магнитного подвеса и трех типов электродвигателя для ускорения ротора ОТС с учетом приведенных выше требований к таким системам, предпочтительна электродинамическая система подвеса, а в качестве ускорителя — двигатель постоянного тока с тиристорными коммутаторами, сочетающему обе функции. При этом эффективная работа систем подвеса и ускорения будет в том случае, когда в качестве источника постоянного магнитного поля используются сверхпроводящие обмотки возбуждения, исключающие необходимость подвода электроэнергии к ротору в процессе его движения.

Элементы рассмотренных систем, предназначенных для подъема и разгона ротора массой в 1—4 млн. тонн, располагаются на самом роторе и вакуумируемой оболочке, которая также поднимается на этапе движения в атмосфере, что является существенным недостатком этих систем. Такое расположение элементов приводит к значительному снижению доли полезного груза, поднимаемого ротором и к увеличению массы оболочки. Кроме того, на левитацию, разгон и подъем самой ТЛС требуются значительные дополнительные расходы энергии, что приведет к снижению общего КПД системы.

Возможно, что этот недостаток можно устранить путем создания комбинированной системы левитации ротора с использованием всех

трех основных типов, указанных в п. 4.1. При этом основная часть системы должна быть стационарной, т.е. находиться на эстакаде вне вакуумируемой оболочки.

Если объединить последнее требование, а также требование исключения возможности возникновения тепловых потерь в роторе, с требованиями к системе левитации в п. 4.1 и к системе разгона в данном пункте, то получим идеальную ТЛС ротора. Решение возникающих при этом проблем найдет применение и при создании перспективных систем наземного сверхскоростного транспорта.

4.3. Проект комбинированной системы разгона и левитации ротора

Учитывая особенности движения ротора и функционирования ТЛС, рабочий цикл разгона ротора и его подъема в атмосфере вместе с оболочкой разделим на 4 периода [IV].

Первый период (пусковой) характеризуется изменением скорости ротора от нулевой до V' , составляющей 100—200 м/с. Электродинамическая сила подъема здесь незначительна, но сила торможения в системе электродинамического подъема достигает пикового значения. Поэтому в первом периоде подвес ротора должен осуществляться либо самим тяговым двигателем, либо вспомогательной стационарной системой, что более предпочтительно. При движении в указанном диапазоне скоростей управление коммутаторным двигателем не представляет большой сложности.

Второй период включает диапазон изменения скорости ротора от V' до V_1 — первой космической скорости, при которой ротор становится невесомым. Здесь происходит постепенное переключение от стационарной к электродинамической системе подвеса, наиболее поддающейся регулированию и саморегулированию, когда сила подвеса изменяется в зависимости от величины зазора, исчезая при достижении ротором положения вдоль центральной оси оболочки. Учитывая переменность веса элементов ротора, как равнодействующей центробежной силы и силы тяготения, систему можно регулировать так, что сила подвеса будет равна весу элементов, исчезая к концу периода. Полезная мощность двигателя идет, главным образом, на создание тяговой силы.

В третьем периоде — от скорости V_1 до расчетной скорости V_0 , конечной для этапа разгона и начальной для этапа подъема, происходит изменение направления равнодействующей центробежной и гравитационной сил: она теперь направлена для каждого элемента ротора

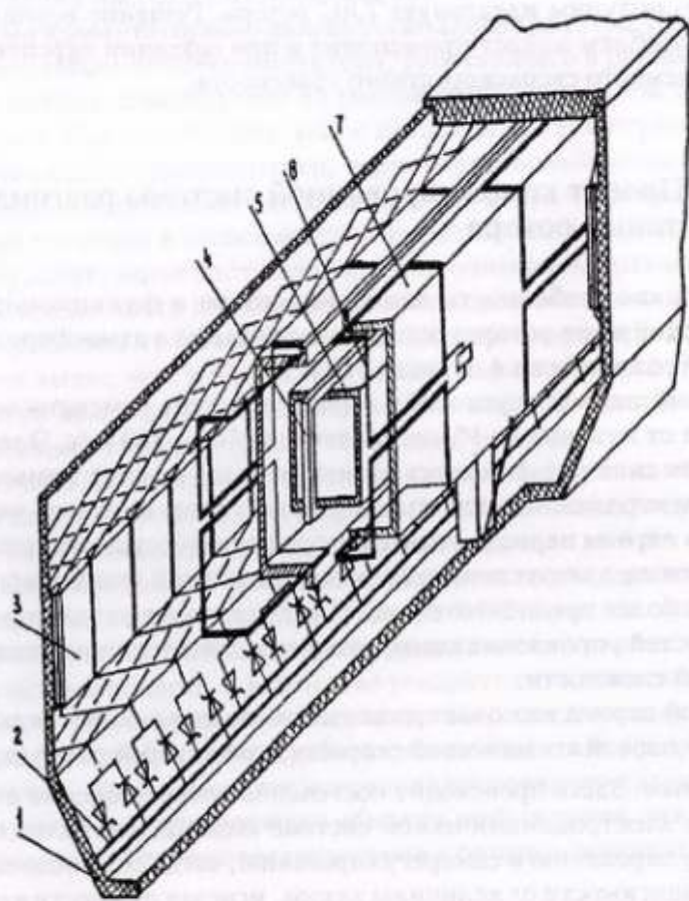


Рис. 4.1. Компонировочная схема ОТС с предлагаемой ТЛС: 1 — эстакада; 2 — фидерная линия с коммутатором; 3 — якорная обмотка ЛЭД; 4 — сверхпроводящая обмотка возбуждения; 5 — ротор; 6 — короткозамкнутые катушки электродинамической системы подвеса; 7 — вакуумная оболочка

вверх по местной вертикали. Электродинамическое усилие левитации также должно изменить направление на противоположное. Максимальное значение такого усилия на единицу длины ротора составляет $V_0^2 / (V_1^2 - 1)$ от веса соответствующего элемента неподвижного ротора.

Четвертый период — промежуточный между этапами разгона и движения ротора в открытом космосе. Основная его особенность — движение ротора в вакуумной оболочке через атмосферу в режиме упругого расширения. От момента отделения от эстакады и до выхода из плотных слоев атмосферы примерно на высоте 100 км, зазор между ротором и оболочкой поддерживается автономной системой электродинамического подвеса без поступления электроэнергии от внешних источников. Левитационное усилие должно быть достаточным для преодоления инерционности оболочки при ее радиальном движении, а также сил тяготения, сопротивления атмосферы и упругости при растяжении оболочки.

Начало радиального движения зависит от соотношения масс оболочки и ротора: чем оно больше, тем большей должна быть начальная для этого периода кинетическая энергия ротора.

Большая масса оболочки приводит к дополнительному расходу энергии, но дает возможность диссипации энергии радиального движения ротора при подъеме и поэтапном сбросе ее частей.

Выбор схемы ТЛС, ее силовые, массовые и другие характеристики должны быть подчинены принятым законам движения ротора на этапе подъема к орбите.

При разработке линейного электродвигателя для ОТС найдена оригинальная схема ТЛС [III], которая может быть частью более полной системы, обеспечивающей подвес и ускорение ротора на этапе разгона, а также бесконтактное ускоренное радиальное движение ротора и оболочки в атмосфере. Главное в предлагаемой схеме (рис. 4.1) — использование сверхпроводящих обмоток возбуждения (СПОВ) 4, установленных вертикально на роторе 5 в его диаметральной плоскости, и дискретных катушек электродинамического подвеса 6 на внутренней поверхности оболочки 7. Сверхпроводящие обмотки возбуждения имеют удлиненную форму, близкую к прямоугольной, и расположены по длине ротора цепочкой — одна за другой. Дискретные короткозамкнутые катушки подвеса образуют два ряда, сдвинутых относительно друг друга в направлении движения ротора на половину шага намотки катушек. Каждая катушка состоит, в свою очередь, из двух петель уголкового профиля, расположенных в вертикальной плоскости одна над другой. Верхний и нижний продольные проводники каждой отогнуты в сторону ротора и находятся в плоскости сверхпроводящих обмоток возбуждения.

Статорные обмотки двухстороннего линейного электродвигателя постоянного тока 3 расположены на обеих вертикальных стенах эстакады 1. Обмотка имеет катушечную конструкцию; подключение ее секций к фидерной линии 2 производится посредством полупроводникового коммутатора, ключевые элементы которого равномерно распределены вдоль эстакады 1. Таким образом, существенная часть элементов линейного электродвигателя удовлетворяет требованию стационарности, располагаясь на эстакаде, что дает возможность ее многократного использования.

ТЛС работает следующим образом. До пуска двигателя выполняются подготовительные операции:

- для уменьшения потерь при разгоне ротора в диапазоне малых скоростей, когда сила торможения в системе электродинамического подвеса достигает пика, размыкают катушки подвеса;

- запитывают постоянным током сверхпроводящие обмотки возбуждения ротора, при этом предполагается применение высокотемпературных, в пределах 20—30 °С, сверхпроводящих материалов, чтобы исключить криостатирование обмоток;

- включают дополнительную (стационарную) систему левитации, осуществляющую бесконтактный подвес ротора внутри оболочки.

Пуск двигателя осуществляют, подавая напряжения на статорные обмотки. Под действием возникающей электромагнитной силы тяги ротор приходит в движение. При достижении скорости V' катушки электродинамического подвеса замыкают накоротко. Под влиянием переменного магнитного поля движущихся СПОВ в них возникают вихревые токи, величина которых достаточна для того, чтобы осуществлять в дальнейшем подвес ротора относительно вакуумной оболочки. Стационарная система подвеса отключается.

Особенность предлагаемой ТЛС — создание необходимой величины тяги и обеспечение при этом в режиме саморегуляции бесконтактного взаимодействия ротора с оболочкой на последних трех периодах процесса разгона и движения в атмосфере:

- в диапазоне скоростей от V' до V_1 , когда ротор обладает "положительным" весом, взаимодействие СПОВ с короткозамкнутыми катушками носит характер отталкивания от нижних петель катушек и притяжения к верхним;

- в диапазоне скоростей от V_1 до V_0 ротор перемещается ближе к верхним петлям катушек; в этом случае СПОВ отталкиваются от верхних и притягиваются к нижним петлям катушек;

- при достижении расчетной скорости V_0 освобождаются захваты, удерживающие оболочку от перемещения; ротор, расширяясь,

принуждает совершать радиальное движение и оболочку. В этом случае левитационная система осуществляет бесконтактный подвес оболочки относительно ротора.

Такая многофункциональность системы подвеса достигается специальной конфигурацией короткозамкнутых катушек. Необходимые электротехнические расчеты, энергетические, силовые, массовые и другие параметры системы приведены в [III]. В частности, показано, что при окружной скорости ротора, равной первой космической скорости V_1 , когда ротор невесом, левитационное усилие электродинамического подвеса предложенной конструкции равно нулю, и система подвеса работает без потерь энергии. Если двигатель и систему подвеса отключить, то при отсутствии аэродинамических и других потерь ротор будет двигаться неограниченно долго. Ротор можно использовать и в качестве эффективного накопителя энергии, для этого в стационарном его положении необходима скорость V_1 .

4.4. Задача о разгоне ротора ОТС

Исследуем движение ротора на этапе разгона при самых общих предположениях о его свойствах, тяговых усилиях двигателя и т.д. В качестве физической модели ротора принимаем кольцеобразный стержень, расположенный коаксиально внутри вакуумной оболочки и равномерно нагруженный продольными тяговыми усилиями от секции линейного электродвигателя. Масса ротора M_p , его радиус R — экваториальный радиус Земли, момент инерции относительно оси вращения ротора $J_z = M_p R^2$. Главный момент тяговых усилий относительно оси Z :

$$M_z = \sum qR = QR, \quad (1)$$

где q — тяговое усилие от одной секции двигателя, $Q = \sum q$ — суммарное тяговое усилие.

Движение ротора рассматривается по отношению к двум системам отсчета с общим началом в центре масс Земли O . Действием окружающих небесных тел — Солнца, Луны и т.д. пренебрегаем. Перемещение точки O не влияет на процесс разгона ротора, поэтому точку O полагаем неподвижной.

В системе $OXYZ$ оси неподвижны; ось Z направлена вдоль оси вращения Земли и ротора, оси X , Y расположены в плоскости экватора. Движение ротора по отношению к этой системе абсолютное.

В системе $OX_1 Y_1 Z_1$ оси X_1, Y_1 расположены также в экваториальной плоскости и вращаются вокруг совпадающих осей Z и Z_1 с угловой скоростью ω_3 Земли. Движение ротора вместе с этой системой переносное, а по отношению к ней — относительное.

В период разгона рассмотрим движение ротора относительно эстакады, неподвижной по отношению системы $OX_1 Y_1 Z_1$, т.е. относительную часть движения. В момент окончания разгона, начала радиального движения ротора и последующем его движении рассмотрим также абсолютное движение. Между скоростями точек ротора существует соотношение

$$V_a = V_e + V_r,$$

где V_a — абсолютная скорость, $V_e = \omega_3 R = 0,46$ км/с — переносная скорость и V_r — относительная скорости точек ротора. В момент окончания разгона $V_a = V_0$, где V_0 — начальная абсолютная скорость на этапе подъема ротора к орбите.

Полезную мощность W электродвигателя полагаем постоянной на этапе разгона ротора; потребляемая мощность $W' = W/K_1$, где K_1 — КПД двигателя. В общем случае постоянна только передаваемая мощность W' , а K_1 и W зависят от скорости V_r относительного движения ротора. При этом функциональная зависимость определяется реализованной схемой двигателя, левитационной системы и т.д. При исследовании динамики ротора в период разгона принимаем усредненные значения K_1 и W . Усредненное значение суммарного тягового усилия связано со скоростью ротора соотношением $Q = W/V_r$. В начальный момент, когда $V_r = 0$, и на некотором малом промежутке $[0, t']$ эта формула неприменима и заменяется другой, не имеющей особенностей. Время пуска исключается из рассмотрения ввиду его малости и, соответственно, малости изменения скорости и перемещения ротора.

Запишем дифференциальное уравнение вращательного движения ротора

$$J_z \frac{d\omega_r}{dt} = M_z,$$

где $\omega_r = V_r/R$ — относительная угловая скорость ротора. После упрощений получим

$$M_p \frac{dV_r}{dt} = Q = \frac{W}{V_r}. \quad (4.1)$$

В результате интегрирования находим зависимость относительной скорости ротора от времени движения

$$V_r = \left(\frac{2Wt}{M_p} \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

Пусть время разгона $t = 5$ суток, конечная абсолютная скорость $V_a = 10$ км/с, следовательно, $V_r = V_a - V_e = 9,54$ км/с, масса ротора $M_p = 2 \cdot 10^9$ кг при погонной массе 50 кг/м. Из (4.2) найдем необходимую полезную мощность $W = M_p V_r^2 / 2t = 211$ млн. кВт.

Для КПД принимаем $K_1 = 0,5$, тогда полная мощность $W' = 422$ млн. кВт, превосходя мощность ракеты-носителя "Энергия" всего в 3,5 раза. Но удельная мощность на тонну поднимаемого полезного груза составляет 211 кВт/т, тогда как для "Энергии" такой же показатель равен $1,2 \cdot 10^6$ кВт/т, т.е. примерно в 6000 раз больше. Ни одна из используемых или разрабатываемых в настоящее время систем подъема грузов в космос не имеет такого низкого значения удельной мощности, как система ОТС.

Представляя V_r как производную ds/dt , где s — дуговая координата некоторой характерной точки ротора, и интегрируя (4.2), находим закон движения ротора вдоль эстакады на этапе разгона

$$s = \frac{2}{3} \left(\frac{2W}{M_p} \right)^{1/2} t^{3/2}. \quad (4.3)$$

Касательное ускорение точек ротора

$$w_r = \frac{dV_r}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{2W}{M_p} \right)^{1/2} t^{-1/2}, \quad (4.4)$$

кроме значений t , принадлежащих малому промежутку $[0, t']$ пуска электродвигателя.

В проекции на нормаль соотношение для элемента ротора с единичной длиной и соответствующей массой m имеет вид

$$\frac{mV_a^2}{\rho} = mg - N,$$

где ρ — радиус кривизны траектории, N — магнитное давление системы подвеса. Для невозмущенного движения $\rho = R$, тогда

$$N = m \left(g - \frac{V_a^2}{R} \right).$$

Это усилие магнитного подвеса, приходящееся на 1 м длины ротора. Оно изменяется от значения веса mg_1 элемента в начале разгона

($g_1 = g - \frac{V_e^2}{R}$ — ускорение свободного падения на экваторе) до нуля,

когда $V_a = V_1 = (gR)^{1/2}$, затем меняет знак и достигает значения

$m \left(\frac{V_0^2}{R} - g \right)$ в конце этапа разгона. Эта величина меньше веса элемента ротора на интервале изменения его абсолютной скорости $[V_1, V_2]$,

где $V_2 = (2gR)^{1/2}$ — вторая космическая скорость. В момент достижения V_2 усилие N принимает значение, равное силе тяготения элемента, но направлено вниз. На участках эстакады, где по условиям рельефа местности $R_{кр} < R$, величина N может превышать в несколько раз вес элемента ротора.

4.5. Динамика возмущенного движения ротора при нарушениях работы системы разгона

На огромном протяжении эстакады и в течение большого промежутка времени разгона — несколько суток — в ускорительной системе могут возникнуть различного рода нештатные ситуации, отклоняющие процесс разгона ротора от номинального режима. К ним относятся: выход из строя одного или нескольких агрегатов на одной из электростанций, питающей энергией некоторый участок ускорительной системы; выход из строя всей электростанции или системы подвода энергии от нее; нарушения в работе самой ускоряющей системы, приводящие к падению мощности на некотором участке и т.д. Такие нарушения могут и не приводить к серьезным возмущениям, изменяя лишь общие характеристики движения ротора — ускорение, скорость, время разгона. Но при более высоком уровне нарушений возможны не-

обратимые последствия. Наиболее серьезные из них — касание ротором оболочек, опасный уровень продольных колебаний ротора, возникновение резонанса и др. — могут привести к разрушениям системы ОТС.

Возникает проблема определения всех возможных отклонений от номинального режима, их различных сочетаний, выявления степени воздействия на процесс разгона ротора, определения границ допустимых отклонений, не приводящих к серьезным последствиям, и мер по ликвидации отклонений за пределами таких границ.

Большая группа нарушений приводит к изменению мощности на некотором участке ΔL линейного электродвигателя и, соответственно, изменению тягового усилия на этом участке. Неоднородность силового воздействия скажется, прежде всего, на локальных по положению и времени изменениях ускорения и скорости частей ротора, которые проходят участок ΔL . Последствием этих изменений будут продольные колебания в конструкции ротора.

Для исследования таких колебаний используем дискретную модель ротора в виде системы n материальных точек одинаковой массы m , замкнутых в форме кольца и соединенных упруго-вязкими связями. Вводим потенциальную энергию упругих связей

$$\Pi(u_i) = \frac{C}{2} \sum_{i=1}^n (u_i - u_{i+1})^2, \quad (4.5)$$

где C — жесткость связей, $u_i(t)$ — отклонение i -ой точки от ее положения в роторе, принимаемом как жесткое кольцо, при номинальном режиме его разгона, описываемом уравнением (4.1) и зависимостями (4.2) — (4.4) соответственно для скорости, перемещения и ускорения ротора. При этом выполняется условие замкнутости кольца $u_{n+1} = u_1$.

При определении эквивалентной жесткости каждой из соединительных пружин используем соотношение [15]

$$C = \frac{nEF}{L},$$

где E — усредненный модуль упругости материала ротора, F — площадь его поперечного сечения, L/n — длина участка между двумя соседними точками, L — длина ротора.

Упругая сила, действующая на i -ю точку:

$$F_i = - \frac{\partial \Pi}{\partial u_i} = -C(2u_i - u_{i-1} - u_{i+1}). \quad (4.6)$$

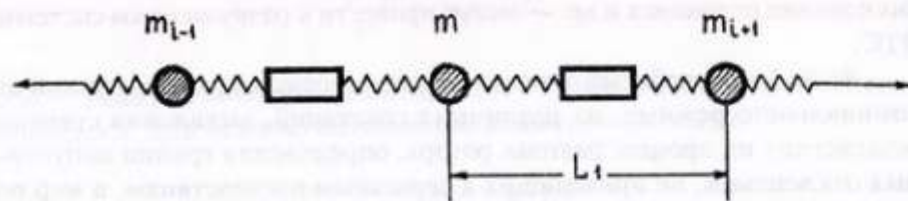


Рис. 4.2. Дискретная упруго-вязкая модель ротора

Аналогично (4.5) вводится диссипативная функция Релея [2]

$$R(u_i) = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n (\dot{u}_i - \dot{u}_{i+1})^2,$$

где λ — коэффициент вязкости материала ротора, $\dot{u}_i = \frac{du_i}{dt}$ — скорость возмущенного движения i -й точки. Диссипативная сила

$$R_i = -\frac{\partial R(\dot{u}_i)}{\partial \dot{u}_i} = -\lambda(2\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1} - \dot{u}_{i+1}).$$

Пусть $\pm \Delta W_1$ — отклонение мощности линейного электродвигателя на участке ΔL_1 (рис. 4.2). Индекс 1 вводится потому, что может быть несколько таких участков, возникающих последовательно с течением времени, ΔL_1 — первый из них. Положение этого участка определяется дуговой координатой S , отсчитываемой вдоль эстакады от некоторой характерной точки O' , принятой за начало отсчета, допустим, точкой пересечения эстакады с нулевым меридианом, до начала участка ΔL_1 . Пусть t_1 — момент времени, отсчитываемый от начала движения ротора, когда произошло нарушение режима; $V_{r1} = \left(\frac{2W}{M_p} t_1\right)^{1/2}$ — средняя скорость точек ротора в этот момент; если в момент t_1 над участком ΔL_1 находилась i -я точка ротора, то время $\Delta t_{1,i}$ ее перемещения над участком определяется с помощью зависимости (4.3):

$$\Delta t_{1,i} = \left[t_1^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{M_p}{2W} \right)^{1/2} \Delta L_1 \right]^{2/3} - t_1. \quad (4.7)$$

В этот промежуток времени возмущающая сила

$$\Delta Q_{1,i} = \pm \frac{\Delta W_1}{V_{r1}}$$

действует на i -ю точку. Для большей точности в знаменатель можно подставить среднее значение скорости ротора за этот промежуток:

$$V'_{r1} = [V_r(t_1) + V_r(t_1 + \Delta t_{1,i})].$$

Следующие моменты времени, когда i -я точка подходит к участку ΔL_1 , определяется из условия: $S(t_{ki}) - S(t_1) = (k-1)L$, $k = 2, 3, \dots$; отсюда получим выражение для k -го момента контакта i -ой точки с участком ΔL_1 :

$$t_{k,i} = \left[t_1^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{M_p}{2W} \right)^{1/2} (k-1)L \right]^{2/3}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.8)$$

Продолжительности такого контакта

$$\Delta t_{k,i} = \left[t_{k,i}^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{M_p}{2W} \right)^{1/2} \Delta L_1 \right]^{2/3} - t_{k,i}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (4.9)$$

Вследствие того, что скорость ротора растет, величины $\Delta t_{k,i}$ убывают, уменьшается также модуль возмущающего воздействия $|\Delta Q_{k,i}| = \frac{\Delta W_1}{V_r(t_{k,i})}$. Отсюда следует, что возмущающее влияние на ротор локального отклонения мощности ΔW_1 убывает с течением времени; график возмущающего воздействия представлен на рис. 4.3.

Первый контакт $i+1$ -ой точки с участком ΔL_1 происходит со сдвигом во времени, определяемом расстоянием L/n между точками:

$$t_{1,i+1} = \left[t_1^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{M_p}{2W} \right)^{1/2} \right]^{2/3}. \quad (4.10)$$

С учетом (4.10) следующие моменты подхода $i+1$ -ой точки к участку ΔL_1 и продолжительности контакта определяются аналогично (4.8) и (4.9), где вместо t_1 и $t_{k,i}$ следует подставить $t_{1,i+1}$ и $t_{k,i+1}$.

В формулах (4.7) — (4.10) использовалось начальное, невозмущенное значение полезной мощности W , с учетом малости величины ΔW_1 по сравнению с W . Более точное значение полезной мощности $W_1 \pm \Delta W_1$.

Картина возмущений резко усложняется, если произойдет несколько нарушений режима разгона: $\pm \Delta W_j$ на участках ΔL_j , в моменты времени $t_j, j = 1, 2, \dots$. Не рассматривая подобную ситуацию, выпишем уравнение возмущенного движения дискретной вязко-упругой модели ротора в случае одного возмущения $\pm \Delta W_1$. С учетом выражения (4.6) для упругих и диссипативных сил, после некоторых преобразований получим

$$m\ddot{u}_i + \lambda(2\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1} - \dot{u}_{i+1}) + C(2u_i - u_{i-1} - u_{i+1}) = \pm \Delta Q_{k,i},$$

$$\Delta Q_{k,i} = \frac{\Delta W_1 M_p^{1/2}}{(2W_1)^{1/2} \left[t_1^{3/2} + \frac{3}{2} \left(\frac{M_p}{2W_1} \right)^{1/2} (k-1)L \right]^{3/2}} \quad (4.11)$$

на интервале времени очередного k -ого контакта i -ой точки с участком $\Delta L_1: [t_{k,i}, t_{k,i} + \Delta t_{k,i}]$ и $\Delta Q_{k,i} \equiv 0$ на всем остальном интервале времени до момента $t_{k+1,i}$ следующего подхода i -ой точки к участку возмущения.

Начальные условия задачи

$$u_i(t_1) = \dot{u}_i(t_1) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

Интегрирование уравнений (4.11) производится до момента t , когда достигается значение относительной скорости $V_r = V_0 - V_c$. Эти уравнения представляют собой довольно громоздкую систему линейных неоднородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами и почти периодическими правыми частями импульсного характера с убывающей интенсивностью и продолжительностью действия. Решение этих уравнений здесь не приводится.

Схема возмущенного движения дискретной упруго-вязкой модели ротора представляется следующей. В той части ротора, которая проходит над участком возмущения ΔL_1 возникают вынужденные про-

должные затухающие колебания точек относительно жесткой "основы" ротора, движущейся по законам (4.2) — (4.3) невозмущенного движения. В частном случае это может быть также апериодическое затухающее движение точек относительно "основы". Части ротора, соседние с возмущающим участком, испытывают возмущающее воздействие от него. В более удаленных частях возмущения затухают до их полного исчезновения. Интенсивность возмущений убывает с увеличением скорости ротора, т.к. убывают возмущающее воздействие и продолжительность его воздействия на отдельные части ротора.

Здесь возможна некоторая аналогия с волнами цунами, когда по невозмущенной поверхности движется волна наибольшей интенсивности, а за ней волны убывающей интенсивности до их полного затухания. Возможна также аналогия с одиночной волной типа солитона.

Опасность представляют случаи, когда величина локальных отклонений превышает критическое значение, при котором происходят необратимые явления — текучесть материала ротора или его разрушение. Следует исследовать случаи, когда скорость нарастания отклонений превышает звуковую скорость материала ротора и взаимодействие имеет ударный характер.

При наличии нескольких участков возмущений $\Delta L_1, \Delta L_2, \dots$ возможно также явление резонанса, когда частота по отдельности безопасных возмущений совпадает с частотой собственных колебаний ротора, в результате чего амплитуда колебаний возрастает. Необходимо также учитывать, что в реальном роторе такие его параметры, как массы отдельных частей, их жесткости, коэффициенты вязкости, прочностные характеристики и т.д. в общем случае различны.

Основной целью исследований системы уравнений (4.11) является определение характера возмущенного движения, наибольших отклонений, скоростей отклонения, определения допустимых значений возмущающих воздействий, условий смены характера движения, условия возникновения резонанса и т.д. При наличии нескольких возмущений задача резко усложняется.

Основное значение имеют меры по предотвращению или надежной ликвидации всякого рода отклонений от номинального режима работы ТЛС.

4.6. Другие возможные возмущения движения ротора при разгоне

Кроме рассмотренных возмущений, связанных с функционированием технической и энергетической частей системы ОТС, возможны

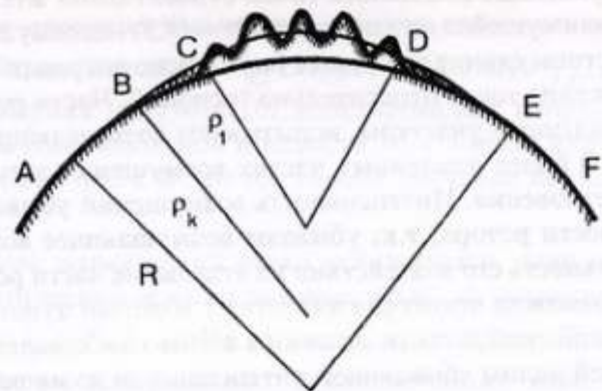


Рис. 4.3. Трасса эстакады ОТС на горном участке. Исходный рельеф — штриховка; насыпные участки — двойная штриховка. Гладкое сопряжение участков с радиусами кривизны R , ρ (переменный) и ρ_1 в точках B , C , D , E

возмущения естественного происхождения — крупномасштабные изменения рельефа земной поверхности — горные массивы, плато и т.д., а также землетрясения, штормы, цунами, изменить характер которых, а тем более предотвратить их, невозможно.

При нахождении эстакады по участкам с крупными изменениями рельефа поверхности основной возмущающий фактор — изменение радиуса кривизны трассы; наиболее опасны случаи, когда меняется знак кривизны или при его постоянстве уменьшается радиус кривизны. Первый случай должен быть исключен, т.к. центробежная сила элементов ротора действует в ту же сторону, что и сила притяжения, а потому не отрывает, а прижимает эти элементы к эстакаде. Во втором случае необходимо отсутствие угловых точек в местах сопряжения участков с различными радиусами кривизны.

В случае прохода трассы через горный хребет или плато этого можно добиться по схеме, показанной на рис. 4.3. Здесь AB — участок трассы вдоль экватора с радиусом кривизны R ; BC — участок с переменным радиусом кривизны ρ_k от R до $\rho_1 < R$, гладко сопрягающийся с участками AB и CD ; CD — участок с постоянным радиусом кривизны ρ_1 ; далее следует участок DE с переменным радиусом $\rho_1 \leq \rho_k \leq R$ и экваториальный участок EF с гладкими сопряжениями в точках D и E .

Трасса на горном участке CD проходит вдоль каньона, проложенного через хребты; изъятые горные породы используются на сооружение насыпей через ущелья на участках BC и DE . Такая трасса более экономична по сравнению с той, которая имела бы всюду постоянный радиус кривизны R , т.к. глубина каньона в первом случае меньше, чем

во втором.

Рассмотрим элемент ротора, движущийся на участке $BCDE$ с радиусом кривизны, отличным от R . Пусть m — масса этого элемента; mg — сила притяжения, направленная к центру Земли вдоль местного радиуса экватора R ; q_3 — тяговое усилие от электродвигателя, приходящееся на данный элемент; N — левитационное усилие от системы подвеса.

При отсутствии угловых точек дифференциальное уравнение движения рассматриваемого элемента в проекции на касательную к траектории имеет вид

$$m \frac{dV_r}{dt} = q \pm mg \sin \alpha, \quad (4.12)$$

где α — угол между касательной к траектории и соответствующей касательной к линии экватора, равный углу между местным радиусом кривизны ρ_k и радиусом экватора R . Этот угол очень мал, поэтому можно записать $\sin \alpha = \alpha$; отрицательный знак принимаем на участке BC_1 , положительный — на участке C_1E , где C_1 — средняя точка участка CD . Элемент ротора здесь въезжает на очень пологую горку, а затем съезжает с нее.

Если уравнение (4.12) суммировать по всем элементам ротора, то получим уравнение невозмущенного движения ротора (4.1), где $M_p = \Sigma m$, $Q = \Sigma q$.

Уравнение возмущенного движения для упруго-вязкой дискретной модели ротора имеет вид (4.11), в правую часть здесь следует поставить возмущающую силу $\pm mq \sin \alpha$, меняющую знак в точке C_1 . Возмущенное движение, как и в предыдущем случае, представляет собой продольные затухающие колебания или апериодическое движение типа одиночной волны.

В проекции на нормаль к траектории, совпадающей с направлением местного радиуса кривизны, получим формулу левитационного усилия N :

$$N = m \left(q \cos \alpha - \frac{V_a^2}{\rho} \right), \quad V_a \leq V^* < V_1,$$

где $V^* = (g\rho_k \cos \alpha)^{1/2}$ — абсолютная скорость, при которой N обращается в нуль. В интервале изменения скорости $V^* \leq V_a \leq V_0$ усилие N меняет направление и определяется формулой

$$N = m \left(\frac{V_a^2}{\rho_k} - q \cos \alpha \right).$$

В этом интервале усилие N может принимать значения, превышающие вес элемента. Пусть максимально допустимое значение N на участке BE в пять раз превышает силу тяготения, тогда для наименьшего радиуса кривизны на участке BE получим соотношение

$$\rho_1 \geq \frac{V_0^2}{g(5 + \cos \alpha)}$$

Если $V_0 = 10$ км/с и $\cos \alpha = 1$, то $\rho_1 \geq 1610$ км. Система подвесов на участке BE с переменным радиусом кривизны должна обеспечить левитационные усилия на всех этапах разгона ротора.

В общем случае возможно искривление формы эстакады по отношению к плоскости экватора: на отдельных участках эстакада может выходить из этой плоскости, огибая особо крупные препятствия (горы, плато, крупные города и т.д.) и возвращаясь затем вновь в эту плоскость. При отсутствии угловых точек правая часть уравнения (4.12) содержит только ускоряющее усилие q_3 линейного электродвигателя, т.е. возмущение вращательного движения ротора отсутствует.

Боковое давление магнитных подвесов, которое необходимо обеспечить в этом случае

$$N_{\text{бок}} = mV_r^2/\rho_2$$

где ρ_2 — радиус кривизны эстакады в плане. Если $\max N_{\text{бок}} = 5$ мг, то $\rho_2 \geq 2100$.

Аналогичные искривления эстакады возможны на морских участках при шторме. Под действием бокового ветра постоянного направления и волн эстакада, закрепленная гибкими связями, может искривиться в плане. В этом случае разгоняющийся ротор играет стабилизирующую роль: подобно потоку воды в резиновом шланге, он спрямляет искривленные участки эстакады. Этот процесс должен происходить без контакта ротора с оболочкой, поэтому необходимо предусмотреть механизм создания бесконтактного бокового давления на ротор со стороны эстакады, либо принимать меры, не допускающие искривления эстакады на морских участках под действием стихийных факторов.

Постоянные искривленные участки эстакады как в плоскости экватора (вертикальные искривления), так и вне ее (горизонтальные ис-

кривления) создают возмущения не только при разгоне ротора, но и при подъеме к орбите. Ротор будет вести себя как натянутая струна, имеющая в начальный момент локальные отклонения от формы, при которой энергия струны минимальна. Такая струна, как известно, совершает колебания.

Ротор, кроме вращательного и радиального движения (невозмущенное движение), совершает в этом случае сложные продольно-поперечные колебания (возмущенное движение). Гашению колебаний способствует возрастающее натяжение ротора и оболочки при их расширении, сопротивление атмосферы, а после сброса оболочки — разделение ротора на фрагменты и действие диссипативных сил. Возникает проблема создания системы, обеспечивающей без подвода энергии извне бесконтактное взаимодействие ротора и оболочки при их пространственных колебаниях.

Более проста задача, когда имеются только вертикальные искривления трассы; тогда поперечные колебания системы совершаются также в плоскости экватора и ротора, и бесконтактное взаимодействие обеспечивается системой левитации на этапе разгона.

Участки с вертикальным искривлением, где подъемная сила ротора больше, чем на линии экватора, можно использовать для подъема в космос негабаритных грузов, подвешенных на оболочке: пассажирских модулей, отдельных блоков, агрегатов, установок для космической индустрии и энергетики, научного оборудования.

Особо опасны в период разгона ротора сейсмические воздействия, которые могут привести к искривлениям и изломам эстакады, поэтому большое значение приобретает разработка конструкции эстакады с высокой степенью сейсмостойкости. Для предотвращения совпадения во времени процесса разгона ротора ОТС с сейсмической активностью Земли в районах, прилегающих к трассе, важную роль будут играть надежные методы прогнозирования землетрясений.

Силовые и энергетические характеристики ТЛС для ОТС со сверхпроводящей обмоткой возбуждения при изменении скорости ротора до значений $V_0 > V_1$, погонной массе 100 кг/м, размером поперечного сечения 0,3 м и потребляемой мощностью 10 кВт/м, вычисленные в [III] приводит к выводу о возможности такого технического решения. Однако реальностью оно может стать только при условии создания сверхпроводников, которые по электрофизическим, весовым и стоимостным показателям находились бы на уровне современных низко-температурных сверхпроводников.

Но и в этом случае возникают многие проблемы реализации ТЛС: повышение КПД двигателя, надежность и устойчивость энергообеспечения ОТС при разгоне его ротора, устойчивость инфраструктуры си-

стемы по отношению к стихийным факторам, экологически безопасное возвращение частей ТЛС для создания в космосе энергетических и транспортных структур и т.д.

Работы по проблемам проекта ОТС актуальны и с земной точки зрения. В процессе технической реализации идеи бесконтактного подвеса и тяги ротора, помимо достижения основной цели — создания средства безракетного освоения космоса — могут быть получены принципиально новые, высокоэкономичные, экологически чистые технологии, поднимающие на качественно новый уровень энергетику и высокоскоростной наземный транспорт.

Проблемы, связанные с движением ротора ОТС на этапах разгона и подъема вместе с оболочкой в атмосфере, не являются простыми. Основные трудности заключаются в выявлении возможных возмущающих воздействий, их тщательной классификации, изучению их источников и природы, определению степени воздействия на движение ротора и мер борьбы с ними.