

ОБОДОВСКИЙ
Юрий Васильевич

ДИНАМИКА МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

01.02.06 – динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена на кафедре «Механика и процессы управления»
ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
профессор Скубов Дмитрий Юльевич

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук,
профессор Ветюков Михаил Михайлович
кандидат технических наук,
доцент Саблин Александр Дмитриевич

Ведущая организация

Институт проблем машиноведения РАН

Защита состоится «09» февраля 2005 г. в 16 часов на заседании
Диссертационного совета Д212.229.13 в Санкт-Петербургском государственном
политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая
ул., 29, корпус 1 ауд. 41

Автореферат разослан « 27 » декабря 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д212.229.13 д.б.н.

А.В.Зинковский

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Появление высокоэнергетических магнитов на основе Nd-Fe-B позволяет решить проблему создания многих механических устройств на принципиально новом уровне. Высокие значения остаточной индукции и коэрцитивной силы, достижимые в постоянных магнитах на сегодняшний день, позволяют передавать значительные усилия без механического контакта за счет взаимодействия магнитных полей.

Первый тип рассмотренной механической системы с постоянными магнитами – синхронная магнитная муфта. Главный недостаток существующих конструкций синхронных муфт – практическое отсутствие пускового момента. При включении на нагрузку разность угловых скоростей ведущего и ведомого дисков может быть весьма значительной. В этом случае непосредственный переход к синхронному режиму затруднен. В диссертации предложен вариант новой конструкции синхронной муфты, обеспечивающей переход к синхронному вращению и устойчивость синхронного режима при значительных отклонениях нагрузки от номинального значения. Проведен динамический анализ магнитной муфты в режиме перехода от асинхронного режима к режиму синхронного вращения.

Другой тип рассмотренной электромеханической системы - электродинамический тормоз. Такой тормоз, выполненный на основе электромагнитов, в течение длительного времени широко используется в горочных замедлителях. Его принципиальное отличие состоит в процессе образования вихревых токов в массиве стального колеса при его движении относительно неподвижной системы магнитов чередующейся полярности, расположенных линейно вдоль железнодорожного полотна. Важнейшим достоинством электродинамического замедлителя является отсутствие механического контакта колеса с конструкцией замедлителя. Это позволяет решить проблему повреждаемости как подвижного состава, так и самого замедлителя в процессе эксплуатации. Кроме того, сила торможения в таком замедлителе практически не зависит от погодных условий (температуры воздуха, влажности, осадков). Использование электромагнитов для этой цели весьма удобно с точки зрения управления силой торможения, но требует значительных энергетических затрат, гораздо больших по сравнению с традиционно используемыми замедлителями с пневмо- или гидропроводом. Это обстоятельство сдерживало до недавнего времени широкое распространение электродинамического способа торможения. Применение постоянных магнитов типа Nd-Fe-B с высокими энергетическими показателями позволяет решить эту проблему. При достаточно небольших размерах магнитной системы и отсутствии внешних источников питания можно получить вихревые токи достаточной амплитуды в массиве катящегося колеса, что приводит к возможности пондеромоторного взаимодействия поля вихревых токов с полем постоянных магнитов и получению тормозящей силы большей величины, чем это позволяет сделать электромагнитная система.

Сложность распределения вихревых токов в массиве катящегося колеса, его нестационарность затрудняют совместное решение электромеханической задачи в прямой полевой постановке. Имеющееся в литературе описание процесса электродинамического торможения основывается преимущественно на экспериментальных результатах, либо на эвристических предположениях того или иного толка. Это позволяет считать актуальной разработку упрощенной и в то же время физически адекватной модели пондеромоторного взаимодействия вихревых токов с полем магнитной системы. Цель динамического анализа такой модели состоит в выводе достаточно простой и удобной для инженерных расчетов формулы для тормозного усилия и проведении численных экспериментов для сравнения полученных результатов с натурным экспериментом.

Цель работы

Цель работы состоит в создании физически адекватных упрощенных математических моделей исследуемых технических устройств, проведении качественного и численно-качественного исследования их динамики и получении методик расчета динамики этих устройств, пригодных для последующего применения при их проектировании.

Основные задачи работы

1. Построение асимптотически упрощенных уравнений, описывающих переход от асинхронного хода к синхронному ходу в синхронной магнитной муфте.
2. Обоснование введения дополнительного демпфирования в синхронную магнитную муфту для обеспечения надежного перехода к синхронному ходу.
3. Разработка методики исследования взаимодействия движущегося проводящего тела с системой неподвижных постоянных магнитов.
4. Построение уравнений движения железнодорожного вагона при его взаимодействии с магнитным замедлителем.
5. Оценка тормозных возможностей замедлителя.

Научная новизна

Математическому моделированию движений проводящих твердых тел в магнитном поле посвящено значительное число работ, однако большинство из них связано с совместным решением краевой электродинамической и механической задач. Работ, в которых проводящие тела заменяются контурами с линейными токами, сравнительно мало. Поэтому исследованные в работе задачи, как по постановке, так и по способу решения и полученному результату являются новыми.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием классических асимптотических методов исследования динамики нелинейных систем, а также сравнением результатов, полученных путем непосредственного численного решения исходных систем и качественного анализа упрощенных.

Практическая ценность

Практическая ценность работы заключается в теоретическом обосновании возможности создания новых видов технических устройств, в частности, синхронных магнитных муфт с возможностью асинхронного пуска, а также в создании методики расчета таких устройств при их проектировании.

Методы исследования

Основными методами решения поставленных задач являются методы теории нелинейных колебаний, в частности, асимптотические методы интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений в сочетании с прямыми методами численного моделирования изучаемых систем.

Апробация работы

Основные результаты представлены на международной конференции Electro-dynamic retardation with permanent magnets for railway transport. Sixth international conference on unconventional and electrical system. Alushta, Ukraine, September, 24 – 29, 2004, на семинаре ИПМаш РАН, сентябрь 2004, на семинаре кафедры «Механика и процессы управления» СПбГПУ, октябрь 2004.

Структура и объем

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 110 страниц текста и иллюстрирована 68 рисунками. Список литературы включает 15 наименований.

Публикации

По теме диссертации опубликованы три работы

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение к диссертации содержит общую характеристику изучаемой проблемы, обзор литературы и краткое содержание самой работы.

Первая глава диссертации посвящена рассмотрению общих методов исследования электромеханических систем, в частности, содержащих постоянные магниты.

При рассмотрении технических электромеханических устройств можно ограничиться случаем, когда бесконечное множество величин векторов магнитной индукции и напряженности электрического поля выражаются через конечное число других величин, формально аналогично обобщенным координатам в механике. Для этого должны быть выполнены условия, называемые условиями квазистационарности. Эти условия заключаются в том, что можно не учитывать электромагнитные волны. Кроме того, часто в практических задачах поперечные размеры проводников малы по сравнению с их длиной и при расчете поля могут рассматриваться как линейные.

Представим себе механическую систему, состоящую из линейных проводников, взаимное расположение которых в процессе движения может изменяться. С точки зрения механического движения для его описания следует ввести обобщенные механические координаты в виде n -мерного вектора $q = (q_1, \dots, q_n)$, где n - число степеней свободы. Будем предполагать, что связи голономные. Тогда для составления уравнений движения в форме уравнений Лагранжа следует записать выражения для кинетической $T(q, \dot{q})$ и потенциальной $\Pi(q)$ энергий системы.

Разветвленные цепи представим в виде наложения m независимых замкнутых неразветвленных контуров, так чтобы токи в контурах были $i_1, \dots, i_m$. Токи в ветвях будут алгебраическими суммами токов к контурам, в которые входит данная ветвь

$$i_j = \sum_{r=1}^m \beta_{jr} i_r, \quad j = m+1, \dots, N \quad (1)$$

где $\beta_{jr} = 1$, если j -я ветвь входит в r -й контур и положительное направление в ней совпадает с направлением контурного тока, $\beta_{jr} = -1$, если j -я ветвь входит в r -й контур и положительное направление в ней не совпадает с направлением контурного тока, $\beta_{jr} = 0$, если j -я ветвь не входит в r -й контур.

Энергия магнитного поля

$$W = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{\mu_0 \mu} B^2 dx dy dz \quad (2)$$

Полагая, что индукция поля линейно зависит от токов, получим, что энергия магнитного поля является квадратичной функцией контурных токов

$$W = \frac{1}{2} \sum_{r,s=1}^m L_{rs} i_r i_s = \frac{1}{2} i^T L i \quad (3)$$

где L - положительно определенная матрица коэффициентов само- и взаимной индукции.

Уравнения, описывающие взаимосвязанные электромагнитные и механические процессы в электромеханической системе, называют уравнениями Лагранжа-Максвелла. Эти уравнения имеют вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial W}{\partial i_r}\right) + \frac{\partial \Phi}{\partial i_r} = E_r, \quad r = 1, \dots, m$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}\right) - \frac{\partial(T+W)}{\partial q_k} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_k} = Q_k \quad k = 1, \dots, n$$
(4)

где E_r - алгебраическая сумма сторонних э.д.с. в r -м контуре, $Q_k(q, \dot{q})$ - непотенциальная обобщенная сила.

Основной особенностью электромеханической системы, содержащей постоянные магниты, является то, что магнитные поля в них обусловлены системой постоянных магнитов, которые могут входить в стационарную часть механической системы, либо являются ее движущейся частью

Обозначим через $q = (q_1, \dots, q_n)$ вектор обобщенных координат механической системы, а через $i = (i_1, \dots, i_m)$ - вектор токов в фиктивных контурах, связанных с проводящими телами. Введем также вектор $J = (J_1, \dots, J_p)$ контурных токов, создающих постоянное магнитное поле. Токи $J_1, \dots, J_p$ считаются заданными и постоянными

Запишем выражения для энергии магнитного поля W

$$W = W_1 + W_2 + W_3 = \frac{1}{2} i^T L i + J^T M(q) J + \frac{1}{2} J^T L_0 J$$
(5)

С учетом всех принятых обозначений и допущений уравнения Лагранжа-Максвелла в векторной форме приобретают вид

$$L i + \frac{\partial M^T}{\partial q} J \dot{q} + R i = 0$$
(6)

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial A}{\partial q} \dot{q} - J^T \frac{\partial M}{\partial q} i + \frac{\partial \Pi}{\partial q} = 0$$

Слагаемое $\frac{\partial M^T}{\partial q}$ в первой группе уравнений из (6) является э.д.с. движения. Во второй группе уравнений слагаемое $J^T \frac{\partial M}{\partial q} i$ представляет собой обобщенную пондеромоторную силу.

Вторая глава посвящена изучению динамики синхронных магнитных муфт.

Типичная конструкция магнитной муфты с аксиальным зазором (торцевой муфты) показана на рис.1.

Торцевая магнитная муфта состоит из ведущего диска 1 и ведомого диска 2, выполненных из ферромагнитного материала, имеющих общую ось вращения и расположенных на некотором расстоянии друг от друга в осевом направлении. На торцевых поверхностях дисков 1 и 2 закреплены постоянные магниты 3, расположенные в кольцевой зоне, коаксиальной оси вращения дисков 1 и 2. Полярность магнитов чередуется в тангенциальном направлении

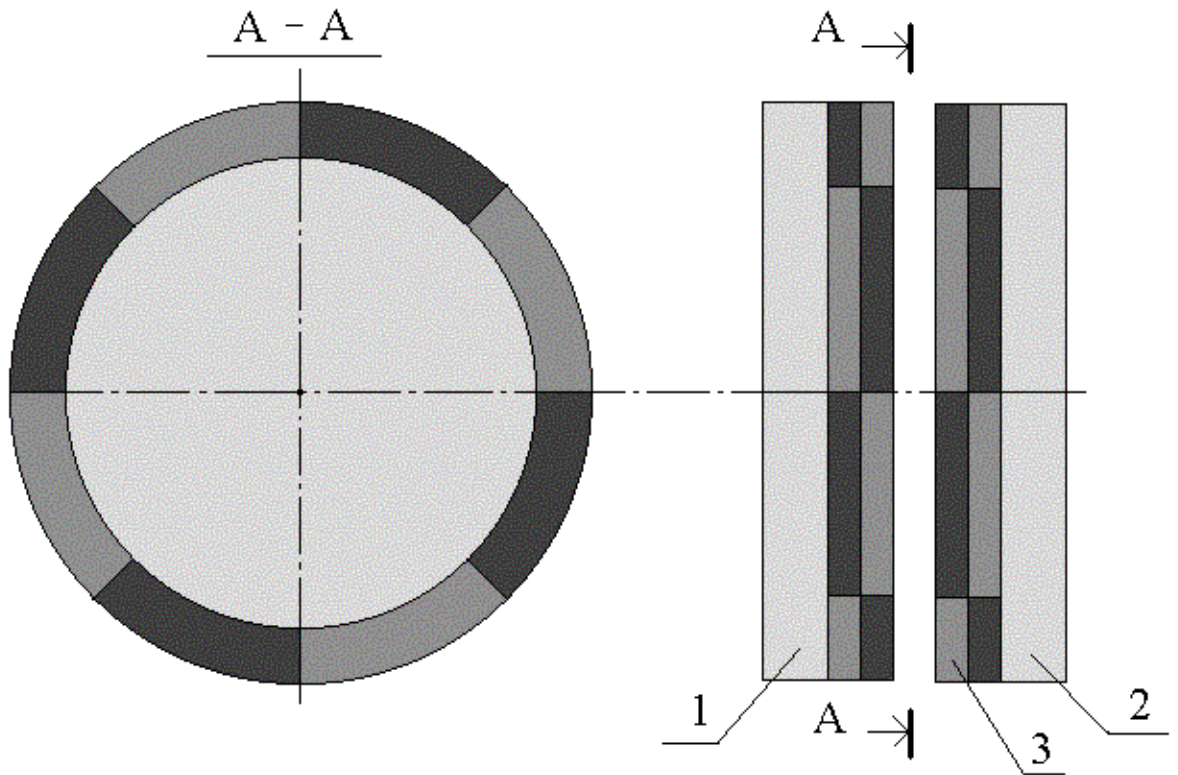


Рис.1. Торцевая магнитная муфта
1 – ведущий диск, 2 – ведомый диск, 3 магнит

Рассмотрим машину, содержащую ротор двигателя, магнитную торцевую муфту и ротор исполнительного устройства

Выражение для энергии магнитного поля может быть записано в виде

$$W = 2p(Hl)^2 \Lambda = p(Hl)^2 \Lambda_{\max} (1 + \cos \varphi) = p(Hl)^2 \Lambda_{\max} (1 + \cos(p(\psi_1 - \psi_2))) \quad (7)$$

где H - напряженность магнитного поля в зазоре муфты, l - длина средних силовых линий в магнитах ведущего и ведомого дисков, $\Lambda_{\max}$ - максимальная магнитная проводимость зазора при согласованном расположении полюсов ведущего и ведомого дисков.

Уравнения движения системы могут быть записаны в форме уравнений Лагранжа-Максвелла и имеют в данном случае вид

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\psi}_1 + m \sin(p(\psi_1 - \psi_2)) &= M(\dot{\psi}_1) - B(p(\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2)) \\ J_2 \ddot{\psi}_2 - m \sin(p(\psi_1 - \psi_2)) &= -H(\dot{\psi}_2) + B(p(\dot{\psi}_1 - \dot{\psi}_2)) \end{aligned} \quad (8)$$

где обозначено - J_1 , J_2 - моменты инерции ведущего и ведомого роторов, ψ_1 , ψ_2 - углы поворота ротора двигателя и ротора исполнительного устройства, φ - «электрический» угол, $m = p^2(Hl)^2 \Lambda_{\max}$, $M(\dot{\psi}_1)$ - крутящий момент двигателя, $H(\dot{\psi}_2)$ - крутящий момент нагрузки, $B(\dot{\varphi})$ - крутящий момент, возникающий вследствие гистерезисного переманчивания постоянных магнитов при их взаимном перемещении.

Уравнения (8) демонстрируют, что с точки зрения механики магнитная муфта представляет собой некоторый упруго-демпферный элемент, обладающий периодической нелинейной упругой характеристикой и нелинейным демпфированием.

В случае двигателя большой мощности можно полагать, что движение ротора двигателя задано $\psi_1 = \omega t$, $\dot{\psi}_1 = \omega$, где ω - угловая скорость вращения двигателя. Тогда уравнение движения приобретает вид

$$\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + \lambda^2 \sin \varphi = \lambda^2 \frac{H}{m} \left(\omega - \frac{\dot{\varphi}}{p} \right) \quad (9)$$

К уравнению (9) добавляются начальные условия

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi'(0) = \frac{p(\omega - \omega_2)}{\lambda} \quad (10)$$

где ω_2 - скорость ведомого ротора в начальный момент времени, $\lambda^2 = \frac{pm}{J}$.

Весьма важным является наличие демпфирующего момента, связанного с гистерезисом при перемагничивании. Эксперимент по оценке демпфирования проведен на лабораторной установке кафедры «Механика и процессы управления» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета при содействии ее сотрудников.

Лабораторная установка, на которой проводились эксперименты, в качестве основного элемента содержит стержень постоянного прямоугольного сечения, который шарнирно оперт по краям. На этой установке была смонтирована модель магнитной системы, как это показано на рис.3. На неподвижном основании 1 закреплена магнитопроводящая пластина 2 с полюсной системой 3. На стержне 4 закреплена магнитопроводящая пластина 5 с полюсной системой 6.

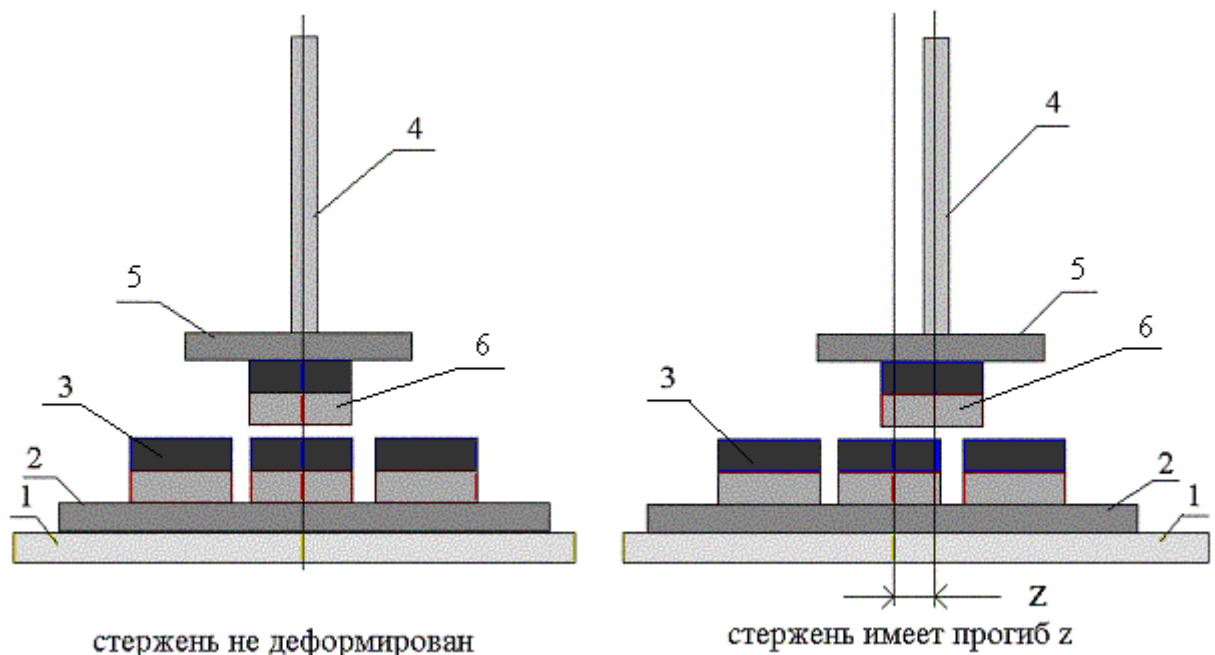


Рис.3. Магнитная система, смонтированная на лабораторной установке.

1 – основание стержень, 2, 5 – магнитопроводящие пластины, 3, 6 – магнитные системы, 4 – стержень (показан в разрезе)

На рис.4 приведена осциллограмма свободных колебаний стержня без магнитной системы и при ее наличии. По этой осциллограмме нетрудно определить частоту свободных колебаний k , которая составляет 9 Гц. За 6 периодов максимальное отклонение уменьшается в 2 раза. Безразмерный показатель затухания составляет $n/k = 0.018$. В последующих вычислениях принято это значение затухания.

сигнал датчика

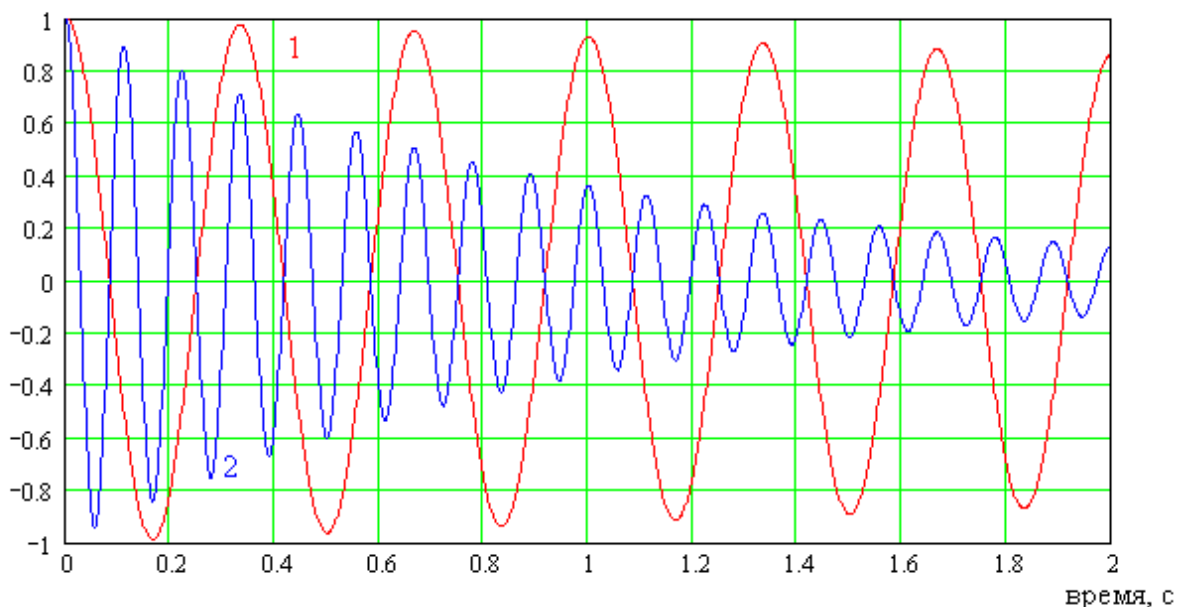


Рис.4. Осциллограмма свободных колебаний
1 – магнитная система отсутствует, 2 – магнитная система установлена

С помощью пакета MATLAB было проведено численное интегрирование уравнения (11) при начальных условиях (12). На рис.5 приведена зависимость скорости скольжения φ' от времени.

Результаты численного интегрирования показывают, что демпфирование, связанное с наличием гистерезисного перемагничивания, является недостаточным для перехода от асинхронного хода к синхронному. Такой результат с практической точки зрения является очень важным для проектирования магнитных муфт.

В литературе известны способы увеличения демпфирования, связанные с размещением дополнительных проводников между полюсами одного из дисков. Здесь предлагается принципиально отличный способ размещения таких проводников.

На рис.6 показано размещение дополнительных проводников на ведомом диске муфты. Короткозамкнутые проводники 4 размещаются так, что они охватывают магнит и его магнитопровод в аксиальном направлении.

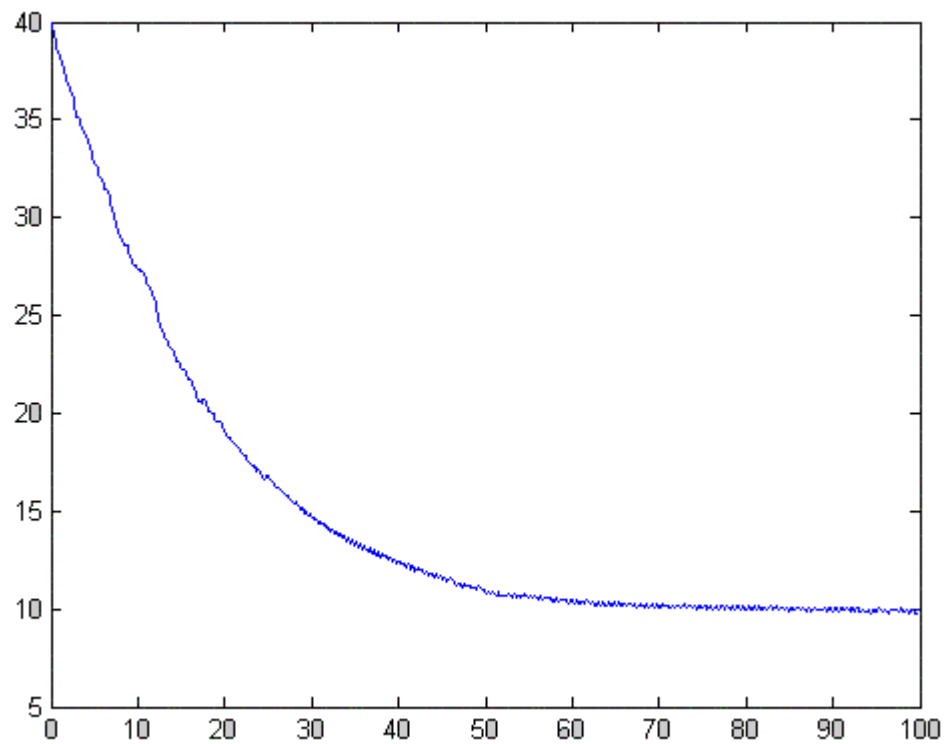


Рис.5. Переходный процесс при наличии только гистерезисного демпфирования

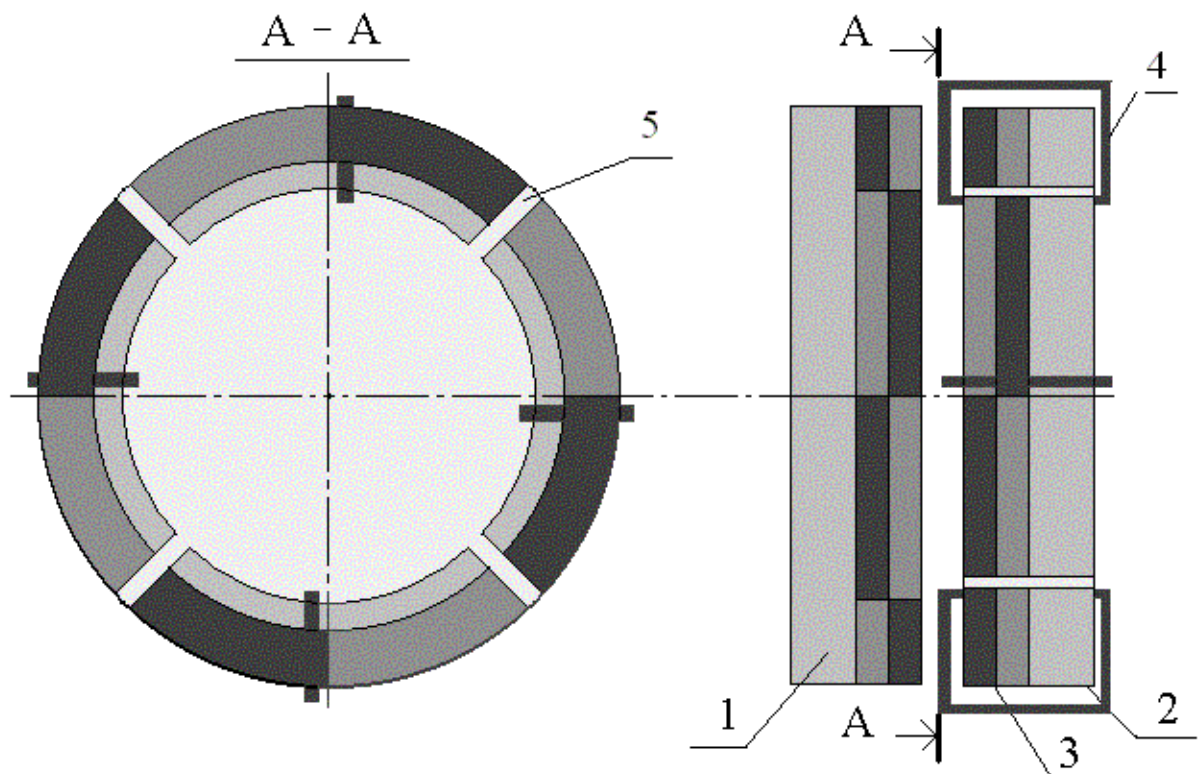


Рис.6. Размещение дополнительных проводников

Уравнения переходного процесса при наличии дополнительных проводников отличается от уравнения (9) наличием дополнительного нелинейного слагаемого

$$\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + b_a\dot{\varphi}(\sin \varphi)^2 + \lambda^2 \sin \varphi = \lambda^2 \frac{H}{m} \left(\omega - \frac{\dot{\varphi}}{p} \right) \quad (11)$$

На рис.7 показаны результаты численного интегрирования уравнения (11) при тех же параметрах муфты, что и на рис.5, но при наличии дополнительных проводников

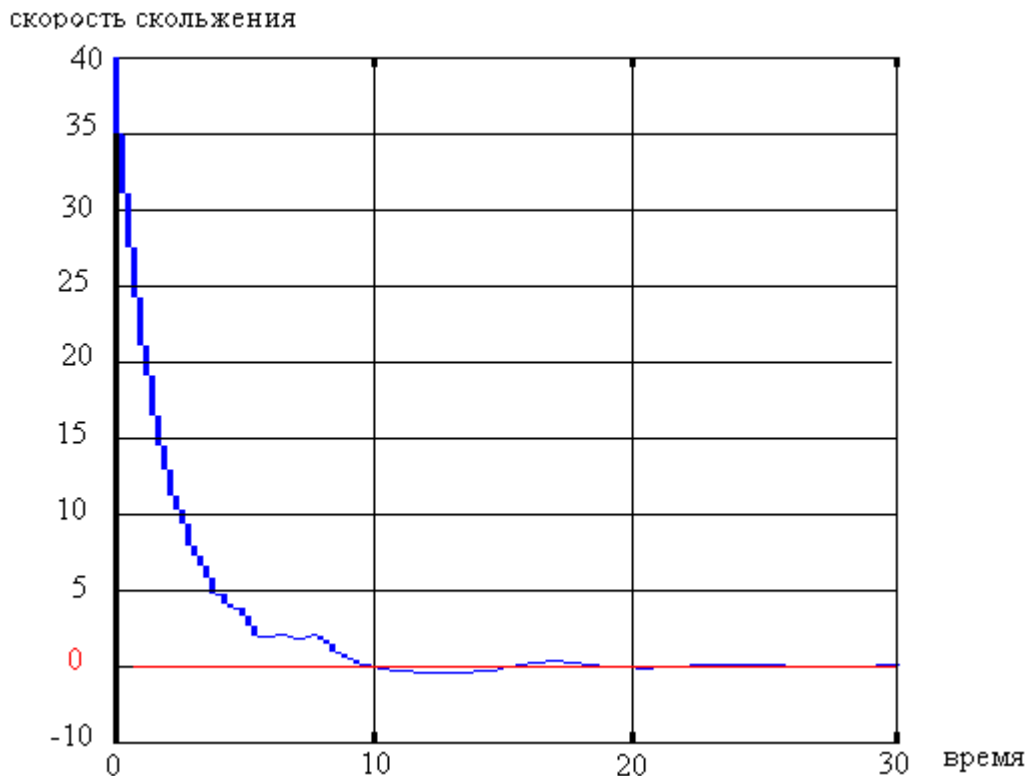


Рис.7. Переходный процесс при установке дополнительных проводников

Третья глава содержит результаты исследования динамики электродинамического замедлителя, основанного на вихретоковом демпфировании.

Схема горочного электродинамического замедлителя с постоянными магнитами показана на рис.8.

Замедлитель состоит из постоянных магнитов 1, закрепленных на кронштейнах 2 вблизи головки рельса 3 по обе его стороны. Между магнитами 1 и ободом колеса 4 имеется некоторый воздушный зазор. Полярность магнитов выбрана так, что напротив друг друга оказываются противоположные полюса. Постоянные магниты собраны в магнитные шины с чередующейся полярностью

Для демонстрации подхода к решению задачи о взаимодействии системы постоянных магнитов с движущимся проводящим телом, рассмотрена некоторая модельная задача. В модельной задаче магнитная система 1 (рис.9, а) имеет вид полосы с чередующимися полюсами.

Разобьем проводящее тело на отдельные одинаковые проводящие контура. Будем полагать, что длина каждого из них в направлении движения кратна длине одного полюса магнитной системы (рис.9, б, показан вид сбоку в разрезе по плоскости симметрии магнитной системы).

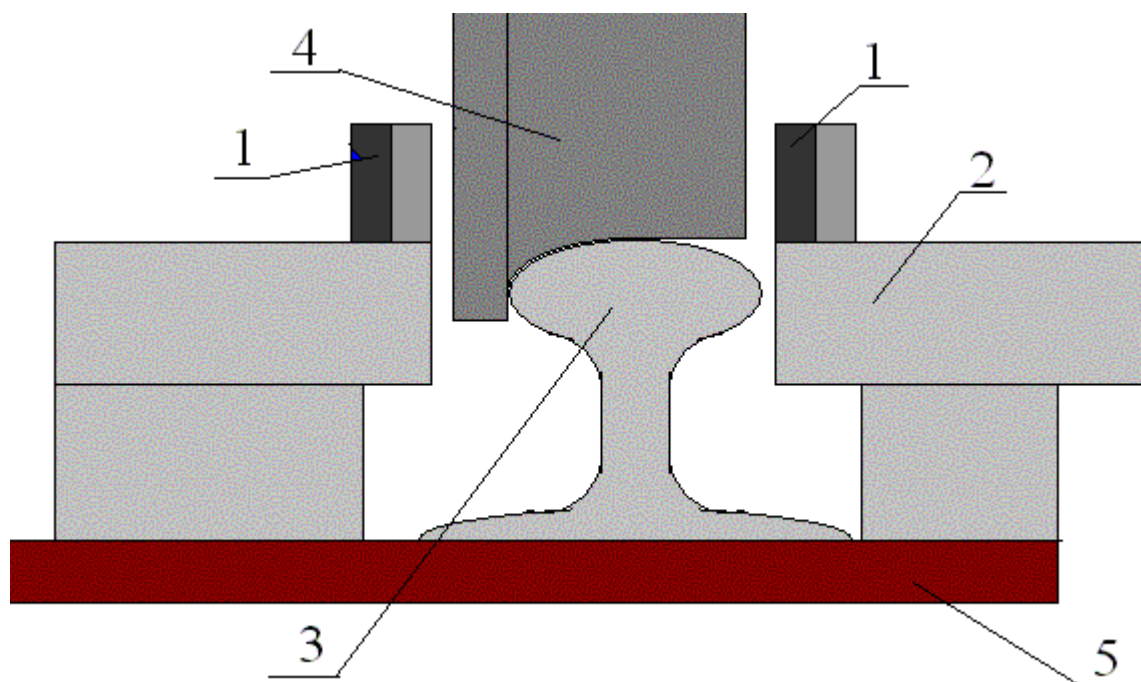
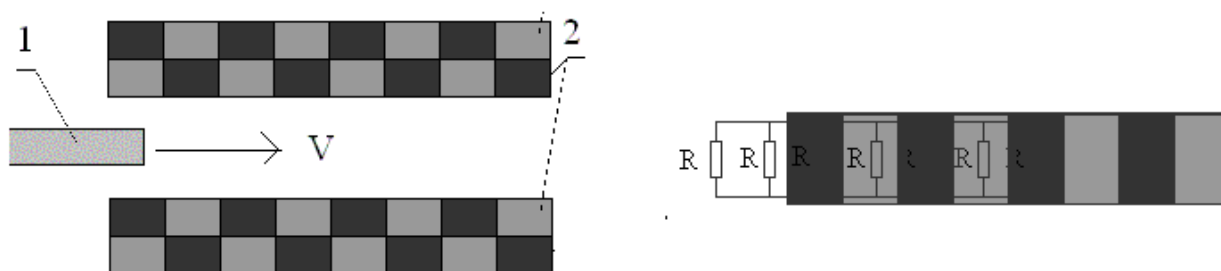


Рис.8. Схема электродинамического замедлителя
1 – постоянные магниты, 2 – кронштейн, 3 – рельс, 4 – колесо, 5 - шпала



а) Магнитная система и проводящее тело б) Разбиение проводящего тела на контуры
Рис.9. Модельная задача

Разобьем проводящее тело на отдельные одинаковые проводящие контура. Будем полагать, что длина каждого из них в направлении движения кратна длине одного полюса магнитной системы (рис.9, б, показан вид сбоку в разрезе по плоскости симметрии магнитной системы).

Магнитный поток через каждый из контуров будет пилообразной функцией положения x контура относительно магнитной системы.

$$\Phi_1(x) = 0 \quad \text{при } x < 0, \quad x > (n+1)l, \quad \Phi_1(x) = BSF(x) \quad \text{при } 0 < x < (n+1)l$$

где B - индукция в зазоре магнитной системы, S - площадь поперечного сечения контура, l - длина одного полюса в продольном направлении, n - число полюсов. Функция $F(x)$ имеет вид, показанный на рис.10.

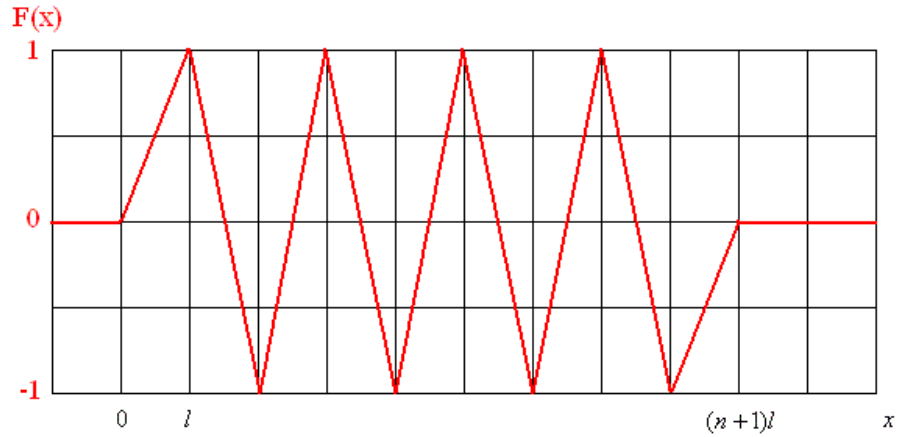


Рис.10. Пилообразная функция $F(x)$

Для каждого следующего контура можно записать, что

$$\Phi_s(x) = \Phi_1(x - (s-1)l), \quad s = 2, 3, \dots, k$$

где k - число контуров на проводнике.

Энергии магнитного поля W

$$W = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^k Li_s^2 + \sum_{s=1}^n \Phi_s(x) i_s \quad (12)$$

где L - индуктивность каждого из контуров.

Уравнения Лагранжа-Максвелла в данном случае будут иметь вид

$$Li_s + BS \frac{\partial F(x - (s-1)l)}{\partial x} i_s + Ri_s = 0, \quad s = 1, 2, \dots, k, \quad m\ddot{x} - \sum_{s=1}^n BS \frac{\partial F_s(x - (s-1)l)}{\partial x} i_s = 0$$

где m - масса проводящего тела.

Полагая малым отношение энергии магнитного поля к кинетической энергии движущегося проводника, можно провести разделение движений, считая, что нарастание тока до максимального значения происходит мгновенно (по сравнению с временем движения контура вдоль полюса). Тогда можно исключить токи и свести задачу к уравнению относительно безразмерной механической координаты $\xi = x/l$

$$\xi'' + \alpha^2 \sum_{s=1}^k (f(\xi - s - 1))^2 \xi' = 0 \quad (13)$$

где обозначено $\frac{\partial F(\xi)}{\partial \xi} = f(\xi)$.

В работе показано, что при увеличении числа контуров, на которые разбивается исходное тело, отличие в пондеромоторной силе проявляется только при движении проводника вблизи края магнитной системы. При увеличении числа контуров нарастание силы вблизи края происходит более плавно, тогда как при малом числе контуров сила изменяется скачком. В практически важном случае при малой длине проводника по

сравнению с длиной магнитной системы можно пренебречь этим краевым эффектом и принимать такое разбиение на контура, которое более удобно для вычислений (в частности, полагать размеры контура, равными длине полюса).

Важным критерием работоспособности замедлителя является вопрос о числе полюсов магнитной системы. В работе показано, что минимальная длина полюса должна быть не менее длины проводника. Более частное деление магнитной системы на полюса разного знака будет увеличивать силу пропорционально отношению квадратов длин проводника и одного полюса. С другой стороны, при достаточно мелком делении магнитной системы на полюса возникнет большое рассеивание поля путем замыкания части поля на соседний полюс. Это возникнет при длине полюса, сравнимой с размерами воздушного зазора.

В качестве примера на рис.11 приведены результаты численного интегрирования уравнения (15). При одинаковом соотношении длины тела и магнитной системы (1:5) магнитная система разбита на 5 (кривая 1) и 10 (кривая 2) полюсов. Для наглядности на оси перемещения показано положение полюсной системы.

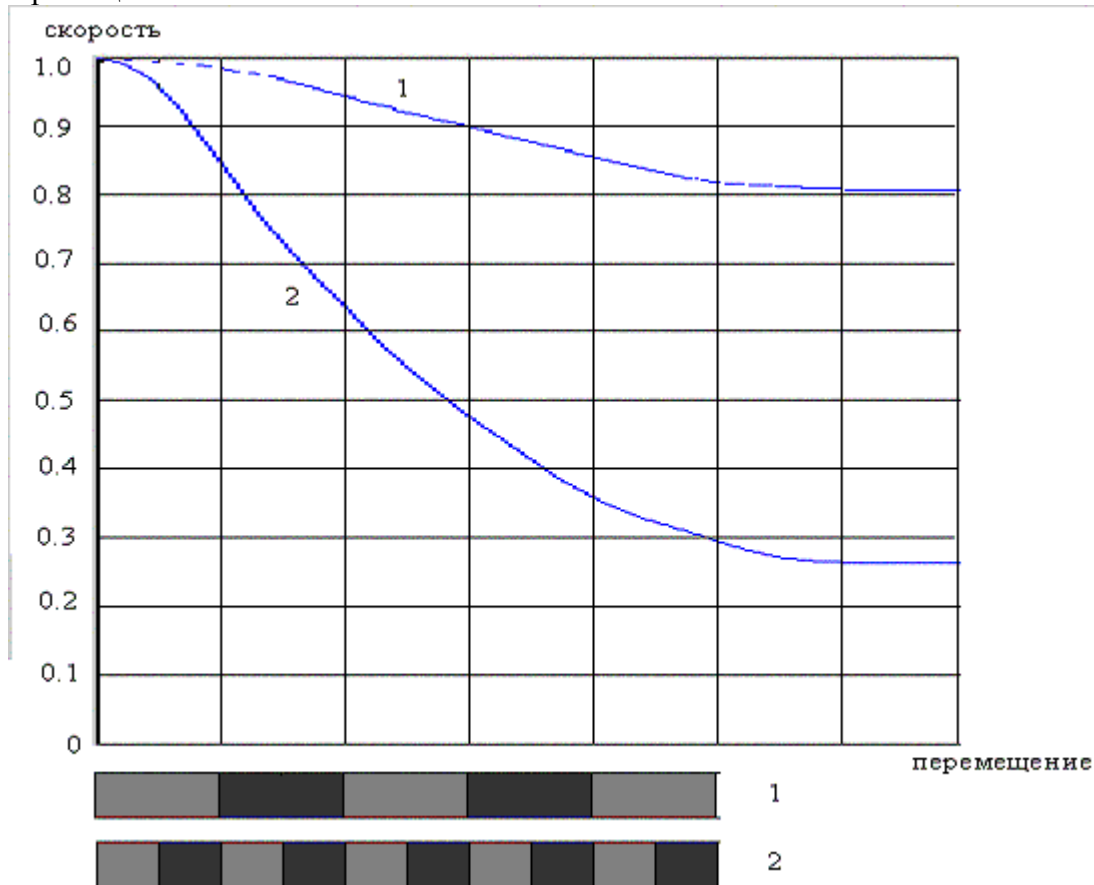


Рис.11. Скорость тела в зависимости от его положения
1 – число полюсов равно 5, 2 – число полюсов равно 10

В уравнении (12) пондеромоторная сила пропорциональна скорости движения проводящего тела. При малых скоростях движения это вполне согласуется с экспериментальными данными. Однако при больших скоростях результаты экспериментов говорят о нелинейной зависимости пондеромоторной силы от скорости. В работе предложено усложнение исходной модели для учета этого. При наличии вихревых токов в контурах их магнитное поле будет оказывать размагничивающее действие на поле основной магнитной системы. Тогда в выражении (12) для энергии магнитного поля следует учесть изменение магнитного потока, пропорциональное токам в контурах

$$W = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^k Li_s^2 + \sum_{s=1}^k (BS + Mi_s) F(x - sl) i_s \quad (14)$$

где величина M характеризует взаимоиндукцию контура и магнита.

С учетом этого уравнения движения приобретают более сложный вид

$$\xi'' + \alpha^2 \sum_{s=1}^k \left(1 - \mu \frac{f(x - (s-1)l)\xi'}{1 + 2\mu f(\xi - s - 1)\xi'} \right) \frac{(f(\xi - s - 1))^2 \xi'}{1 + 2\mu f(\xi - s - 1)\xi'} = 0 \quad (15)$$

причем безразмерный параметр μ характеризует относительную величину взаимоиндукции.

На рис.12 показаны результаты численного интегрирования уравнения (15) при различных значениях безразмерного параметра μ .

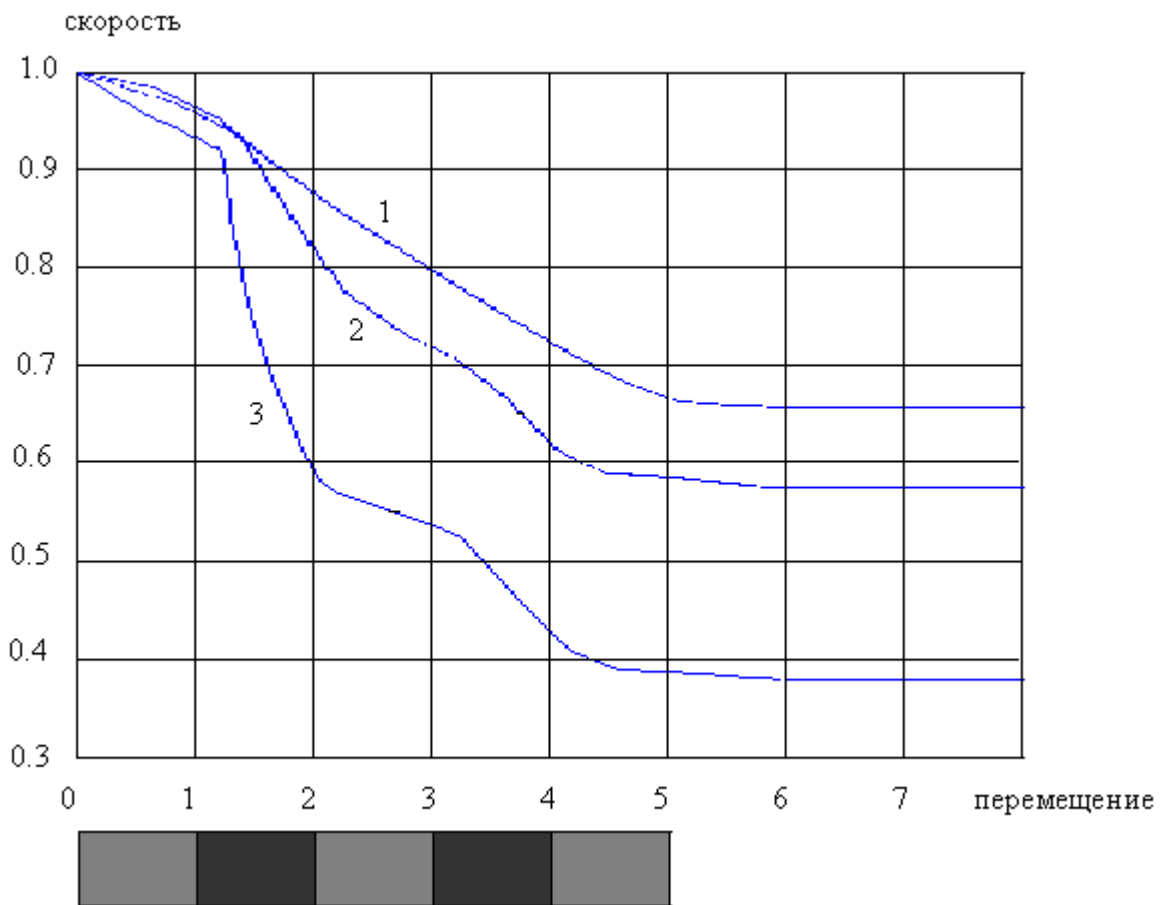


Рис.12. Скорость тела при учете влияния поля вихревого тока

1 - $\mu = 0$ (влияние отсутствует), 2 - $\mu = 0.2$, 3 - $\mu = 0.4$

В задаче о движении вагона вдоль пути, оснащенного магнитным замедлителем, вагон рассматривается как твердое тело. Взаимодействие вагона с замедлителем происходит через колеса вагона.

На рис.13 показано текущее положение колеса. Колесо разделено на проводящие контура в виде трапецеидальных секторов с центральным углом β . Радиус внутреннего контура такого сектора меньше радиуса колеса на высоту магнитной шины. Длину полюса принята равной длине дуги сектора $a\beta$. За обобщенную координату принято

перемещение центра колеса x . Введен также угол φ , связанный с x соотношением

$$\varphi = \frac{x}{a} + \left(\frac{\pi}{2} - \beta\right).$$

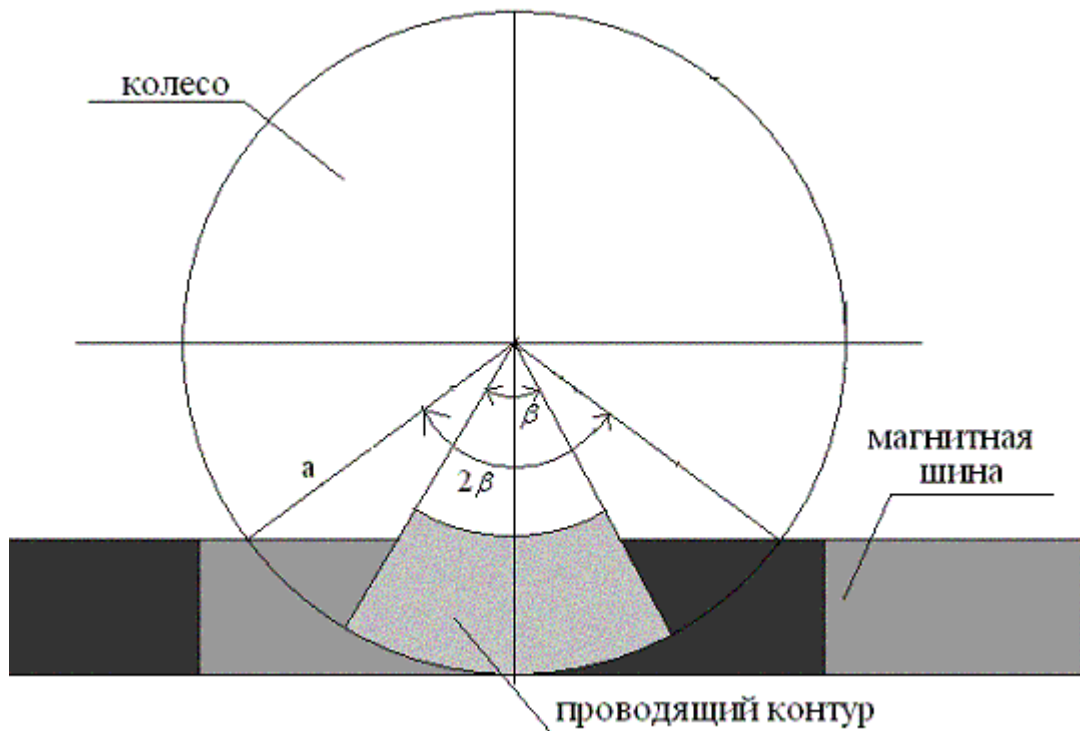


Рис.13. Текущее положение колеса

При движении колеса вдоль магнитной шины одновременно три контура пересекают магнитное поле (рис.14).

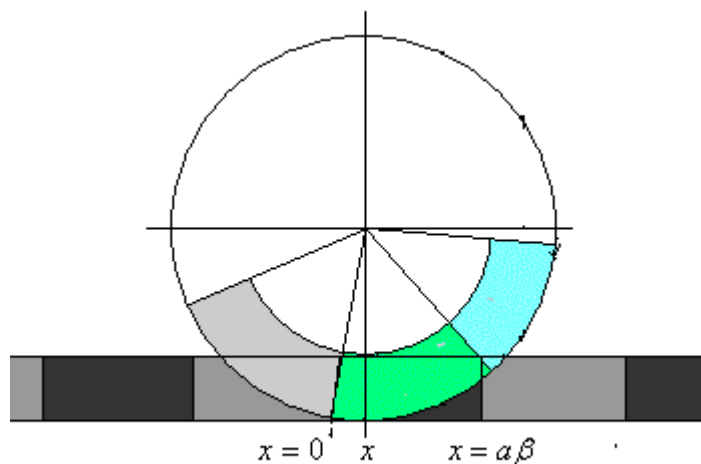


Рис.14. Расположение соседних контуров при некотором положении колеса

Энергия магнитного поля есть сумма энергий, связанных с каждым из трех контуров

$$W = (\Phi_1 i_1 + \Phi_2 i_2 + \Phi_3 i_3) \quad (16)$$

где потоки через контура Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 связаны с положением колеса x

$$\begin{aligned}\Phi_1(x) &= Ba^2 G(x), & \Phi_2(x) &= -Ba^2 G(x + a\beta), & \Phi_3(x) &= Ba^2 G(x + 2a\beta), \\ G(x) &= \frac{1}{2}(\varphi - \frac{\pi}{2} + \beta - \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{ctg} \varphi)), & 0 < x < a\beta, \\ G(x) &= \frac{1}{2}(\beta - \cos^2 \beta (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg}(\varphi - \beta))), & a\beta < x < 2a\beta \\ G(x) &= \frac{1}{2}(-\varphi - \frac{\pi}{2} + 2\beta - \cos^2 \beta (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{ctg}(\varphi - \beta))), & 2a\beta < x < 3a\beta\end{aligned}$$

Уравнение движения вагона с учетом того, что индуктивности контуров пренебрежимо малы, имеет вид

$$m\ddot{x} + \frac{1}{R} \left(\left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_3}{\partial x} \right)^2 \right) \dot{x} = Q \quad (17)$$

Для вагона, скатывающегося по пути, имеющему угол наклона α по отношению к горизонтали, обобщенная сила в правой части уравнения (17) $Q = -mg \sin \alpha$. Кроме того, в выражении для обобщенной силы может быть учтено влияние различных сил сопротивления.

На рис.15 представлены результаты численного интегрирования уравнений движения вагона. Угол β принят равным $\pi/6$, радиус колеса $a = 0.5$ м, величина индукции $B = 0.3$ Тл, сопротивление контура $R = 10^{-6}$ Ом, масса вагона 50 т, путь не имеет наклона, другие виды сопротивления движению отсутствуют. Для наглядности на оси перемещений нанесено изображение полюсов магнитной шины.

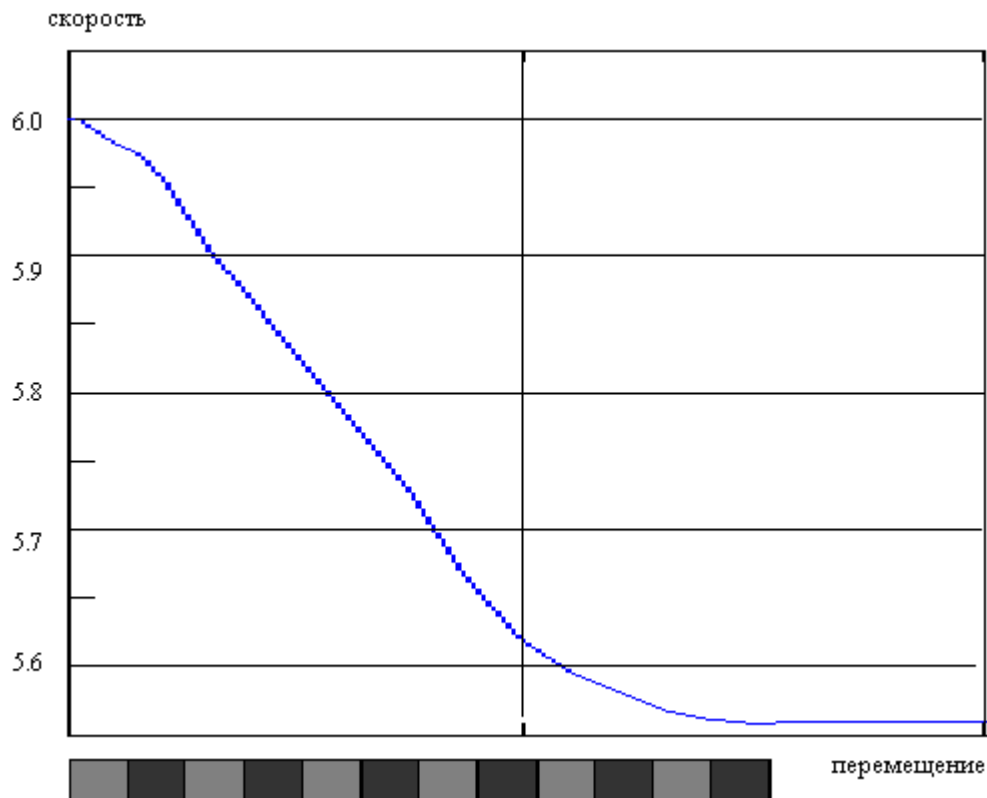


Рис15. Зависимость скорости движения вагона от перемещения при прохождении замедлителя, состоящего из 12 полюсов

В заключении приведены основные результаты и выводы.

Основные результаты и выводы

1. В работе рассмотрены задачи динамики двух типов механических устройств с постоянными магнитами – бесконтактной синхронной магнитной муфте и электродинамическом замедлителе для железнодорожного транспорта.
2. Рассмотрены особенности описания движения электромеханических систем с помощью уравнений Лагранжа-Максвелла при наличии постоянных магнитов.
3. Приведено решение задачи о процессе перехода магнитной муфты от асинхронного режима к синхронному. Проведена экспериментальная оценка величины демпфирования, связанного с гистерезисным взаимным перемагничиванием. Предложена конструкция магнитной муфты с дополнительным вихретоковым демпфированием, позволяющая существенно расширить диапазон параметров, при которых возможен переход к синхронному режиму.
4. Предложена методика учета влияния магнитного поля вихревого тока на поле постоянного магнита.
5. На основе предложенного подхода проведено решение задачи о взаимодействии магнитного замедлителя с движущимся колесом подвижного состава.
6. Проведены расчеты и оценена эффективность горочного замедлителя, основанного на вихретоковом демпфировании.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- 1) Glagolev B.S., Mahova E.A., Obodovsky Ju.V., Skubov D.Ju., Shtukin L.V. Electro-dynamic retardation with permanent magnets for railway transport. Sixth international conference on unconventional and electrical system. Alushta, Ukraine, September, 24 – 29, 2004.
- 2) Б.С.Глаголев, Ю.В.Ободовский, Д.Ю.Скубов, Л.В.Штукин. Динамика магнитной муфты с дополнительным вихретоковым демпфированием. Деп. ВИНТИ, 04.11.2004, № 1734-B2004.
- 3) Б.С.Глаголев, Ю.В.Ободовский, Д.Ю.Скубов, Л.В.Штукин. Динамика горочного замедлителя на постоянных магнитах. Деп. ВИНТИ, 04.11.2004, № 1735-B2004.