

6
А-61
P

326

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московский ордена Ленина энергетический институт

На правах рукописи

Г.Г.Гаврилов

К ИССЛЕДОВАНИЮ И РАСЧЕТУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДВЕСОВ
(Специальность 05.240 - электрические аппараты)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва

1971

Введение

В последнее время как у нас, так и за рубежом всё больше и больше получает распространение новое перспективное направление в технике — магнитный подвес.

Сущность магнитного подвеса состоит в том, что силы тяжести подвешенного тела, а также нагрузка на него уравниваются с помощью сил, создаваемых магнитным полем, в результате чего это тело свободно "парит" в пространстве, находясь в устойчивом состоянии относительно окружающих предметов.

Развитие данного направления привело к появлению магнитных подвесов различных типов.

Области применения магнитных подвесов могут быть самыми различными. Назовём некоторые из них: подвешивание вертикальных и горизонтальных осей и валов всевозможных аппаратов, приборов, машин и других устройств; прецизионный стабилизатор переменного тока; высокоточные электромагнитные весы; подвес моделей самолётов или ракет в аэродинамической трубе; приборы для измерения концентрации и плотности жидкости, для исследований при низких температурах; применение магнитных подвесов для транспорта; ультрацентрифуги; бестигельная плавка металлов и сплавов и т.д.

Вопросами теории и конструирования приборов и устройств с использованием магнитного подвеса занимались в СССР многие учёные, что отражено в трудах В.К. Аркадьева, О.Г. Кацнельсона, Л.С. Эдельштейна, В.М. Позинского, С.М. Калебина, В.В. Владимировского, И.П. Телятникова, А.Н. Воробьёва, М.В. Кулакова, Г.Г. Раева, Е.П. Шахматова, А.А. Фомина, Л.В. Лазаревой, И.Д. Колодеева, А.И. Судовцева, Л.З. Пивень, Е.А. Никитина, С.А. Шестова, Н.И. Брежина, Л.Н. Медведева, Л.Б. Пец и других.

Из зарубежных исследований в этой области следует указать рабо-



ты: В.Браунбека, Дж.Бимо, М.Лавет, А.Бозердик, П.Джери, Ф.Хольмес, Л.Тонко, Р.Уолдрон, Дж.Титтель, Ш.Дрейнер, Ф.Гилинсон, В.Денхард, Р.Фразир, Х.Мори, Р.Канэко, А.Такару, З.Кларк и некоторых других.

Настоящая работа посвящена исследованию и расчёту электромагнитных подвесов с резонансной цепью и состоит из шести глав, заключения и шести приложений.

В диссертационной работе автор попытался дать инженерные методы расчёта магнитного подвеса на заданные параметры с учётом комплексного магнитного сопротивления стали, поля рассеяния и поля выпучивания.

При расчётах за основу положена международная система единиц СИ. В ряде случаев в скобках показана размерность в системе СГС или СГСМ.

Глава I.

Обзор принципов действия магнитных подвесов.

Первая глава диссертации посвящена обзору принципов действия магнитных подвесов по данным отечественной и зарубежной технической литературы.

Анализ их принципов работы позволил создать общую классификацию магнитных подвесов. В основу классификационной таблицы положена величина относительной магнитной проницаемости μ_z тела подвеса. Все магнитные подвесы таким образом можно разбить на четыре крупные группы. К первой группе отнесены диамагнитные подвесы ($\mu_z < 1$), сверхпроводящие подвесы ($\mu_z = 0$) и индукционные подвесы ($\mu_z = 1$ или даже $\mu_z = 0$ в высокочастотном магнитном поле). Вторая группа ($\mu_z > 1$) содержит подвесы на постоянных магнитах; электромагнитные подвесы ферромагнитных тел без и с системой авторегулирования. Последняя подгруппа разбита на две: подвесы ферромагнитного сердечника в соленоиде и электромагнитные подвесы с резонансной цепью. К

третьей группе отнесены кондукционные подвесы ($\mu_z = 1$). И, наконец, в четвертую группу включены комбинированные подвесы, принцип действия которых основан на оозместном использовании двух или более выше перечисленных типов подвесов.

Используя в классификационной таблице разбиение большого многообразия магнитных подвесов по основным типам, получим:

- 1) диамагнитные подвесы;
- 2) сверхпроводящие подвесы;
- 3) индукционные подвесы;
- 4) подвесы на постоянных магнитах;
- 5) подвесы ферромагнитных тел с системой авторегулирования;
- 6) подвесы ферромагнитного сердечника в соленоиде;
- 7) магнитные подвесы с резонансной цепью;
- 8) кондукционные подвесы;
- 9) комбинированные подвесы.

Кроме этого в первой главе сделана попытка создания подробной классификации магнитных подвесов на постоянных магнитах. Все подвесы данного типа разбиты на две группы: подвесы системы "магнит-магнит" и подвесы системы "магнит-ферромагнетик".

В каждой из этих групп произведено разбиение на подгруппы по типу опор: магнитные радиальные подшипники, магнитные упорные, магнитные радиально-упорные подшипники.

Для магнитных радиальных и упорных подшипников системы "магнит-магнит", как наиболее полно описанных в технической литературе, проведена более подробная классификация.

В основу классификации положено расположение магнитов (коаксиальное или соосное), направление намагничивания (радиальное или осевое), принцип взаимодействия подвижных и неподвижных магнитов (отталкивание, притяжение или одновременно отталкивание и

притяжение).

В первой главе проведён также подробный анализ электромагнитных подвесов, обоснован выбор типа подвеса для исследования, поставлена задача.

Глава 2.

Исследование и расчет силовых характеристик электромагнитного подвеса с резонансной цепью.

Во второй главе выводится уравнение центрирующей силы и рассматривается влияние на неё изменений напряжения питания, точки настройки подвеса, добротности, величины начального зазора.

При симметричном положении ферромагнитного ротора между полюсами магнитных систем 1, 2, 3, 4 (рис. 1) силы притяжения ротора к полюсам вышеуказанных систем будут равны ($F_1 = F_2 = F_3 = F_4$) при равенстве геометрических и электрических параметров систем. Центрирующая сила в этом случае будет отсутствовать ($F_c = 0$). При смещении ротора в каком-либо направлении появляется центрирующая сила F_c , стремящаяся возвратить ротор в центральное положение. В общем случае центрирующая сила равна геометрической сумме проекций всех сил притяжения на направление смещения. При выводе для удобства принято, что ротор смещается в горизонтальном направлении вправо. Принято также, что вес ротора скомпенсирован каким-то образом и в расчёте центрирующей силы не участвует. Тогда, как показали эксперименты, влияние систем 1 и 3 на величину центрирующей силы столь незначительно, что им можно пренебречь. В этом случае

$$F_c = F_4 - F_2. \quad (I)$$

Условия появления центрирующих сил создаются в резонансной цепи R, L, C при работе на спадающей ветви резонансной кривой (рис. 1, е)

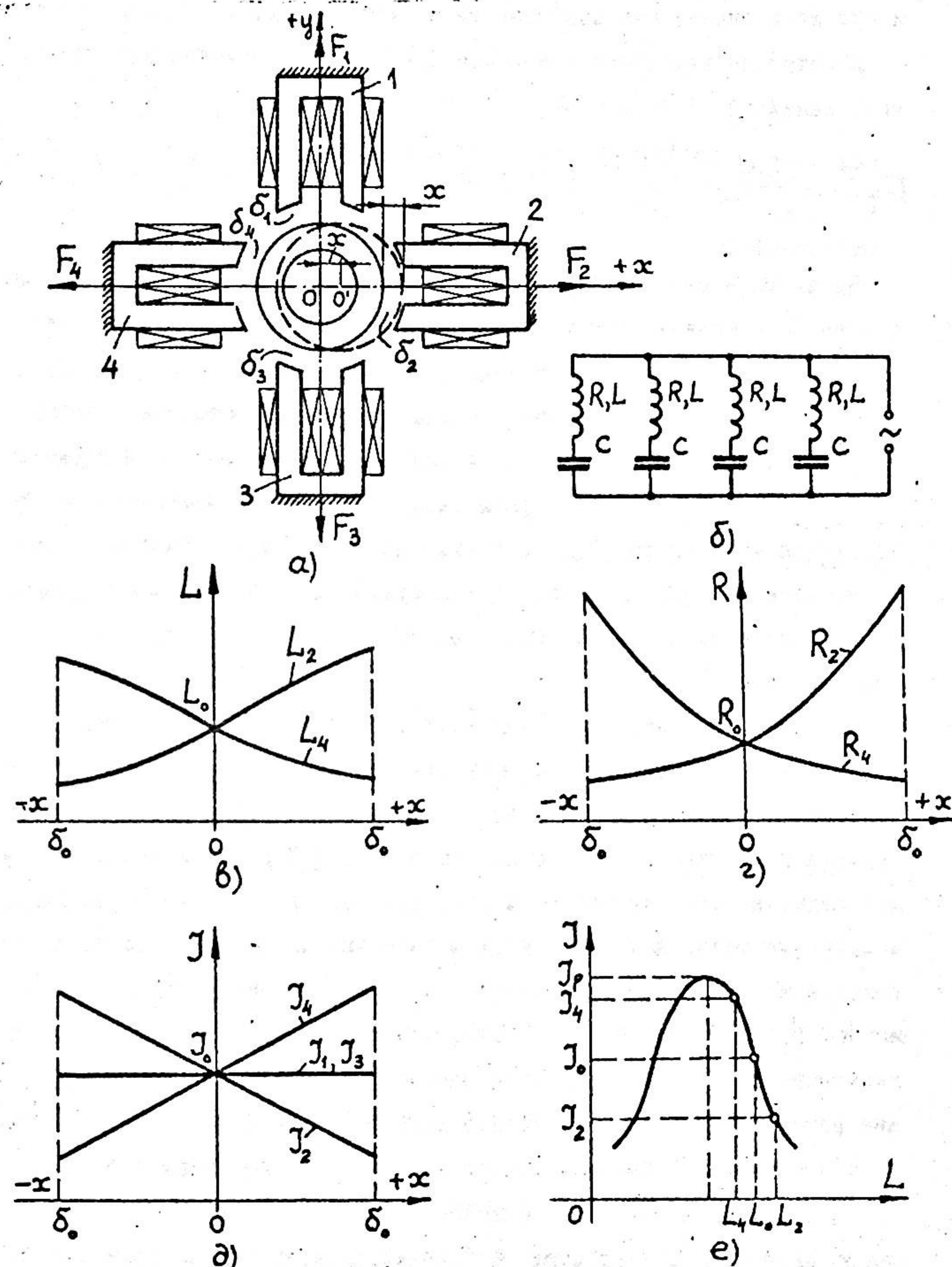


Рис. 1. Исследуемая система магнитного подвеса.

а) расположение магнитопроводов вокруг ротора; б) схема соединения; в) кривые изменения индуктивностей; г) кривые изменения сопротивлений; д) кривые изменения токов; е) резонансная кривая.

и при добротности катушек подвеса не менее двух.

В качестве исходного уравнения для электромагнитной силы взято уравнение:

$$F = \frac{\partial W_m(J, x)}{\partial x} = \frac{\partial \left[\frac{1}{2} L(x) J^2 \right]}{\partial x} = J L(x) \frac{\partial J}{\partial x} + \frac{1}{2} J^2 \frac{\partial L(x)}{\partial x} = \bar{F}_J + \bar{F}_L. \quad (2)$$

Здесь W_m — электромагнитная энергия поля; J — ток; x — смещение ротора; L — индуктивность катушки; $\bar{F}_J$ и $\bar{F}_L$ — соответственно компоненты силы, учитывающие изменение тока и индуктивности.

Для появления центрирующей силы при смещении ротора вправо по горизонтальной оси необходимо, чтобы сила $\bar{F}_2$ уменьшилась (с уменьшением зазора δ_2), а сила $\bar{F}_4$ увеличилась (с увеличением зазора δ_4). Как видно из формулы (2), для этого необходимо, чтобы преобладала компонента силы $\bar{F}_J$, учитывающая изменение тока. Преобладание этой компоненты будет тем сильнее, чем выше $\frac{\partial J}{\partial x}$, т.е. чем выше добротность катушки.

При смещении ротора в вышеуказанном направлении изменяются индуктивности катушек L_2 и L_4 (рис. I, б, в), а также активные сопротивления катушек R_2 и R_4 (рис. I, г). В работе даётся методика расчёта индуктивностей и полных сопротивлений катушек для нескольких величин смещения ротора с учётом потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, а также с учётом поля выпучивания и рассеяния. Используя интерполяционную формулу Ньютона по зависимостям $L = f(x)$ и $R = f(x)$ (рис. I, в и г), получены аналитические выражения для индуктивностей и сопротивлений катушек, зависящие только от смещения ротора x , но учитывающие все вышеуказанные факторы. Это позволяет использовать вычислительную машину, ускоряющую расчёт различных вариантов. Выражая эти зависимости через индуктивность L_0 и сопротивление R_0 , соответствующие центральному положению ротора,

будем иметь:

$$L_2 = L_0(1 + a_1 x + a_2 x^2 - a_3 x^3 + a_4 x^4 - a_5 x^5 + a_6 x^6) = L_0 N; \quad (8)$$

$$L_4 = L_0(1 - b_1 x + b_2 x^2 - b_3 x^3 + b_4 x^4 - b_5 x^5 + b_6 x^6) = L_0 M; \quad (4)$$

$$R_2 = R_0(1 + d_1 x + d_2 x^2 - d_3 x^3 + d_4 x^4 - d_5 x^5) = R_0 D; \quad (5)$$

$$R_4 = R_0(1 - k_1 x + k_2 x^2 - k_3 x^3 + k_4 x^4 - k_5 x^5) = R_0 K. \quad (6)$$

Здесь a, b, d и k с соответствующими индексами — коэффициенты многочленов.

В приложении I показана методика нахождения аналитического выражения функции по таблице её значений.

Зная величины индуктивностей и активных сопротивлений катушек подвеса для различных величин смещения ротора x , можно вычислить и построить кривую изменения тока в катушках подвеса (рис. I, д). Центрирующая сила, полученная через параметры катушки в симметричном положении и величину смещения ротора имеет следующий вид:

$$F_4 = \frac{1}{2} \frac{U^2 L_0}{R_0^2} \left\{ \frac{1}{(K^2 + A^2)^2} \left[(K^2 + A^2) \frac{dM}{dx} - 2M \left(K \frac{dK}{dx} + A Q_0 \frac{dM}{dx} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{(D^2 + B^2)^2} \left[(D^2 + B^2) \frac{dN}{dx} - 2N \left(D \frac{dD}{dx} + B Q_0 \frac{dN}{dx} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

где $A = Q_0 M - (Q_0 - \eta)$; $B = Q_0 N - (Q_0 - \eta)$;

U — напряжение питания подвеса, в; Q_0 — добротность катушек подвеса при центральном положении ротора; η — параметр, характеризующий точку настройки подвеса.

$$\eta = \left(\frac{1 - \gamma^2}{\gamma^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \text{где} \quad \gamma = \frac{J_0^2 Z_0}{J_p^2 R_0}. \quad (8)$$

Здесь J_0 и J_p — действующие значения токов, соответствующих точке настройки подвеса и резонансу; Z_0 — комплексное электрическое сопротивление, соответствующее точке настройки подвеса:

$$Z_0 = R_0 + j(\omega L_0 - \frac{1}{\omega C}). \quad (9)$$

Знак центрирующей силы определится автоматически, если в формуле (7) будут учтены знаки всех производных $\frac{dN}{dx}$, $\frac{dM}{dx}$, $\frac{dD}{dx}$, $\frac{dK}{dx}$ в зависимости от направления смещения.

Зная параметры подвеса R_0, L_0, Q_0 и γ , формула (7) позволяет определить величину центрирующей силы для любого заданного перемещения ротора x и проанализировать влияние на неё следующих факторов: изменение напряжения и частоты источника питания, точки настройки, величины добротности катушек и величины начального зазора.

Жёсткость подвеса равна:

$$C_F = \frac{dF_c}{dx} \quad (10)$$

Ввиду сложности формулы центрирующей силы, жёсткость рекомендуется определять графическим дифференцированием полученных зависимостей $F_c = f(x)$.

В результате исследования уравнения центрирующей силы уточнено условие функционирования подвеса:

$$Q_0 \geq 3\gamma. \quad (11)$$

Общая добротность катушки подвеса определяется

$$Q = \frac{X}{R_e + R_{\sim}}, \quad (12)$$

где R_e и $R_{\sim}$ - соответственно электрические сопротивления катушки постоянному и переменному току; X - реактивное электрическое сопротивление катушки.

При частоте питания 400 гц и выше добротность Q приблизительно равна добротности магнитопровода с зазором

$$Q_{\mu} = \frac{X}{R_{\sim}}, \quad Q \approx Q_{\mu}, \quad (13)$$

и это тем точнее, чем выше частота возбуждения f , так как всё меньше сказывается влияние на общую добротность активного электрического сопротивления R_e катушки постоянному току.

Для добротности магнитопровода с зазором получена зависимость:

$$Q_{\mu} = \frac{R_{\mu}}{X_{\mu}} = \frac{1}{\rho_x} \left(\rho_k + \frac{\pi \cdot \cos \alpha}{\sqrt{2} \mu \cdot K_8} \right), \quad (14)$$

где R_{μ} и X_{μ} - соответственно активное и реактивное магнитные сопро-

тивления; ρ_k и ρ_x - соответственно удельные активное и реактивное магнитные сопротивления стали; l и S - длина и сечение магнитопровода; Π - коэффициент, показывающий, какую часть от длины магнитопровода оставляют воздушные зазоры; K_8 - коэффициент, учитывающий увеличение проводимости воздушного зазора за счёт поля выпучивания; α - угол скоса полюса; μ_0 - магнитная постоянная. При выводе формулы (14) принято, что сечение сердечников, ярма, якоря одинаковые.

Используя выражение (14), для магнитопровода исследуемой системы построены зависимости начального зазора δ_0 от частоты $\delta_0 = \varphi(f)$ и от добротности $\delta_0 = f(Q_{\mu})$, позволившие сделать ряд качественных выводов: 1) Чтобы сохранить выбранное значение добротности магнитной системы, необходимо с увеличением частоты возбуждения увеличивать начальный воздушный зазор δ_0 ;

2) Если увеличивать частоту возбуждения f , оставив тот же воздушный зазор, то добротность уменьшается;

3) Добротность магнитопровода Q_{μ} возрастает, если увеличивать начальный воздушный зазор δ_0 при одной и той же частоте источника питания f ;

4) Между тремя параметрами f , δ_0 и Q_{μ} существует определенная взаимосвязь, которая позволяет быстро выяснить, насколько эффективно используется магнитный подвес;

а) При заданной величине f из кривых $\delta_0 = \varphi(f)$ определяется величина δ_0 для выбираемой добротности Q_{μ} ;

б) Если же, наоборот, задана величина δ_0 , исходя, например, из механических и технологических соображений, то для заданного значения Q_{μ} из кривых $\delta_0 = f(Q_{\mu})$ или $\delta_0 = \varphi(f)$ определяется величина f ;

в) Если δ_0 и f получились слишком большими, то для магнитопровода следует выбрать материал с более высокими магнитными свойствами.

Тогда можно достичь желаемой величины добротности при меньшем воздушном зазоре δ_0 .

Установлено, что для каждого магнитного материала существует своя частота возбуждения, при которой добротность системы максимальна (например, для стали 344 толщиной 0,2 мм такой частотой является $f = 1300$ гц).

В этой же главе рассматривается также обобщенная динамика магнитного подвеса с резонансной цепью.

Радиальное движение ротора выражается уравнением:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + K_d \frac{dx}{dt} + C_F x = \sum F; \quad (15)$$

$$F_n + F_d + F_c = \sum F.$$

Здесь m - масса ротора; K_d - коэффициент демпфирования радиальной скорости; C_F - магнитная радиальная жесткость; x - радиальное смещение ротора; $\sum F$ - сумма внешних сил.

Уравнение (15) означает, что сумма инерционной силы F_n , силы демпфера F_d и центрирующей силы F_c должна равняться сумме внешних сил $\sum F$, чтобы обеспечивалась стабилизация подвешенного тела.

Соотношение между магнитной радиальной жесткостью C_F и массой ротора m определяет собственную частоту незатухающих колебаний

$$f_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_F}{m}}, \quad (16)$$

где T_0 - период незатухающих колебаний.

Если частота электромагнитной силы, которая вдвое превосходит частоту питающей сети, хотя бы на порядок превосходит собственную частоту незатухающих колебаний f_0 , то подвешенный ротор воспринимает среднее значение электромагнитной силы

$$F_{cp} = \frac{F_m}{2}, \quad (17)$$

где F_m - амплитудное значение силы, и в этом случае решение уравнения (15) сводится к известному в литературе.

В приложении 2 приводится расчет коэффициентов демпфирования и выбор демпфирующего устройства для исследуемого магнитного подвеса.

Глава 3.

Опытное определение составляющих комплексного магнитного сопротивления ряда магнитных материалов на частотах от 400 до 4800 гц.

С точки зрения обеспечения максимальной добротности магнитопровода и обеспечения стабилизации подвешенного ротора магнитные подвесы с резонансной цепью выгодно использовать при повышенных частотах питающей сети порядка 400-2500 гц. Магнитные цепи электрических аппаратов, приборов и других электромагнитных устройств, работающих на переменном токе, наиболее удобно рассчитывать комплексным методом. Данный метод позволяет рассчитывать магнитные цепи любой конфигурации с учетом магнитного сопротивления стали, потерь на гистерезис и вихревые токи, рассеяния и размагничивающего действия электромагнитных экранов. Однако, широкое применение указанного метода до сих пор ограничивалось недостаточным количеством комплексных магнитных характеристики широко применяемых магнитных материалов на разных частотах. В книге Б.К.Буля "Основы теории и расчета магнитных цепей", "Энергия", 1964г. приведены кривые магнитных сопротивлений электротехнической стали марок Э12 и Э41 толщиной $\Delta = 0,5$ мм при частоте 50 гц. Кроме того в монографии М.И.Белого и В.В.Корнилова "Магнитные материалы измерительных преобразователей" Приволжское издательство, 1967г. приведены комплексные магнитные характеристики сталей Э44 $\Delta = 0,21$ мм, Э810 $\Delta = 0,09$ мм, Э350 $\Delta = 0,08$ мм, Э340 $\Delta = 0,08$ мм, пермаллоев 50Н $\Delta = 0,2$ мм и 79НМ $\Delta = 0,11$ мм для частоты 400 гц.

Настоящая глава имеет своей целью дополнить имеющиеся комплекс-

ные магнитные характеристики, и таким образом расширить диапазон применения комплексного метода расчёта, используя его, в частности для расчёта цепей магнитных подвесов.

Нами были определены опытным путём кривые удельных магнитных сопротивлений ρ_R, ρ_x, ρ_z в зависимости от индукции сталей Э320 $\Delta = 0,5$ мм; Э44 $\Delta = 0,2$ мм и пермаллоя 50НП $\Delta = 0,02$ мм и 0,1 мм на четырёх частотах в диапазоне от 400 до 4800 гц.

Измерения проводились на установке У520 Киевского завода "Точ-электроприбор". Индукция в тороиде увеличивалась до состояния насыщения. Постоянный учёт коэффициента формы дал возможность определять значения ρ_R, ρ_x, ρ_z и при насыщении. Коэффициент формы вычислялся по отношению показаний вольтметров действующих и средних значений.

Глава 4.

Исследование системы магнитного подвеса с помощью моделирования на электропроводной бумаге.

Для определения проводимостей системы магнитного подвеса использовался метод моделирования на электропроводной бумаге, получающий в последнее время всё большее распространение вследствие удобства измерений, небольших затрат времени и средств на изготовление модели и проведение эксперимента, а также вследствие достаточной для обычных цепей точности. Максимальные погрешности расчёта проводимостей ненасыщенных систем при этом моделировании составили по данным ряда исследователей 7-8%, что вполне приемлемо для многих практических целей. По мере насыщения стали эти погрешности растут, однако в обычно исследуемом диапазоне индукций они не столь значительны, чтобы отказаться от расчётов с помощью моделирования.

В этой главе приведены результаты исследования системы магнитного

подвеса с помощью этого моделирования. Рассматривались только плоскопараллельные поля без учёта магнитного сопротивления стали. Для исследования использовалась модернизированная установка ЭГДА 9/60, позволяющая моделировать вихревое поле, описываемое уравнением Пуассона.

В работе рассмотрены необходимые условия подобия при моделировании плоскопараллельного магнитного поля на электрических моделях.

Применительно к исследуемой магнитной системе подвеса рассмотрен вопрос определения граничных условий в основной и вспомогательных плоскостях. Одной из границ выбрана линия индукции с промежуточным электрическим потенциалом.

Показано, как определяется продолжение искусственной границы на обратной стороне модели.

Предлагается методика определения коэффициентов приведения к полной намагничивающей силе по отношению соответствующих площадей сечения катушки.

Сделана попытка использовать электромоделирование плоскопараллельных магнитных полей в расчёте объёмного поля реальных магнитных систем.

Глава 5.

Расчёт магнитных цепей электромагнитных подвесов.

От точности расчёта магнитной цепи подвеса зависит расчёт его параметров, таких как габариты, потребляемая мощность, жёсткость и другие.

В этой главе уделено внимание методике расчёта магнитных цепей подвесов, которая позволяет получить необходимое потокораспределение при учёте магнитных проводимостей воздушных зазоров, рассеяния, а также магнитного сопротивления стали с учётом влияния гистерезиса

в вихревых токов.

В начале главы сделан краткий обзор методов расчёта магнитных проводимостей воздушных путей. Рассмотрен ряд способов решения трёхмерной задачи: суммирование частичных объемов, метод расчётных полюсов и метод с использованием коэффициентов рассеяния.

Приводится оценка этих методов и даются рекомендации по их использованию.

В этой главе проведен также аналитический расчёт магнитных проводимостей частичных объемов исследуемой системы электромагнитного подвеса.

Введя некоторые упрощения в реальные линии индукции, получено общее уравнение приведённой удельной магнитной проводимости частичной трубки (фигуры) :

$$g_y = \int K_y \frac{dy}{l} \quad (18)$$

Здесь коэффициент приведения равен отношению магнитного напряжения U_x , под которым находится данная трубка, к падению магнитного напряжения на воздушном зазоре U_δ :

$$K_y = \frac{U_x}{U_\delta}; \quad (19)$$

dy и l - соответственно ширина и длина трубки потока.

Таким методом получены аналитические выражения для всех введённых частичных фигур в основной и вспомогательной плоскостях исследуемой системы магнитного подвеса. В приложении 3 приводятся вычисления проводимостей исследуемой системы с помощью моделирования на электропроводной бумаге и по выведенным аналитическим формулам.

Расхождение не превосходило 6,5%.

В работе проведено также некоторое развитие метода Ротерса, т.е. метода суммирования частичных объемов без снятия картины поля. Введённые Ротерсом объёмы - параллелепипед, четверть цилиндра, четверть оболочки цилиндра, 1/8 шара и 1/8 оболочки шара - позволяют

вычислять проводимость только между прямоугольным полюсом и плоскостью или между двумя прямоугольными полюсами. Если полюс имеет какую-то сложную форму полюса, то частичных объемов, введённых Ротерсом недостаточно. Буль О.Б. ввёл ещё две фигуры (фигуры 8 и 9 в табл. I) - полусегмент и полусерп - составленные из прямых линий и частей окружности. Однако, при расчёте магнитных проводимостей между полюсом и якорем, имеющим цилиндрическую форму, возникает необходимость введения новых простых фигур. Речь идёт о фигурах 4, 5, 7, 10 и II в табл. I.

При выводах приняты следующие допущения и ограничения:

- а) магнитное сопротивление стали магнитопровода равно нулю;
- б) линии индукции перпендикулярны к поверхности магнитопровода;
- в) контуры простых фигур состоят из дуг окружностей и отрезков прямых линий.

В общем случае удельные магнитные проводимости фигур определяются по уравнению

$$g' = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{l_x} \quad (20)$$

или приближенно

$$g' = \frac{C_{cp}}{l_{cp}}, \quad (21)$$

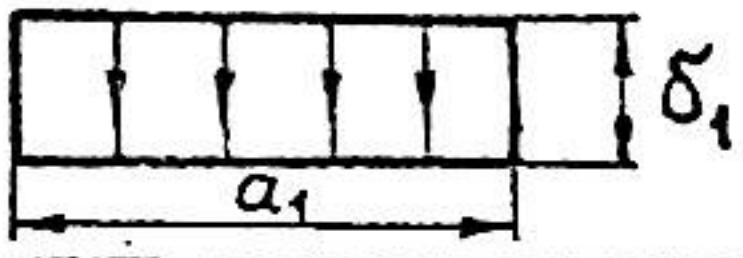
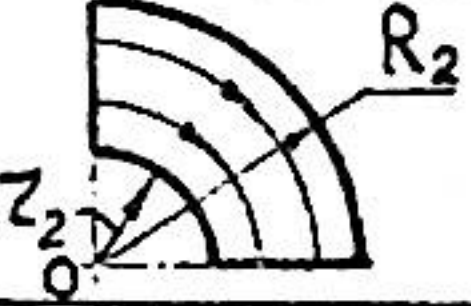
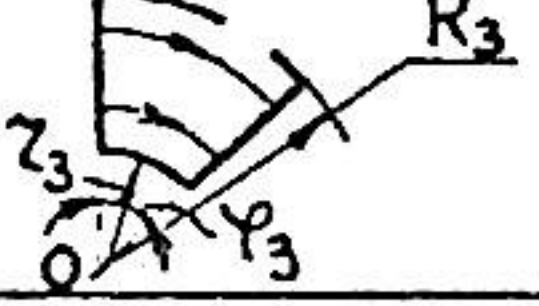
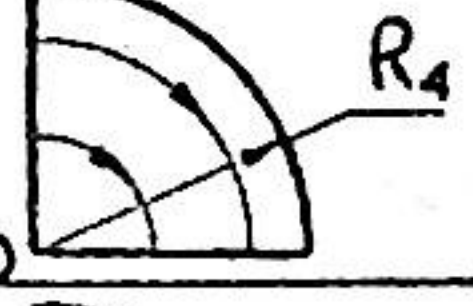
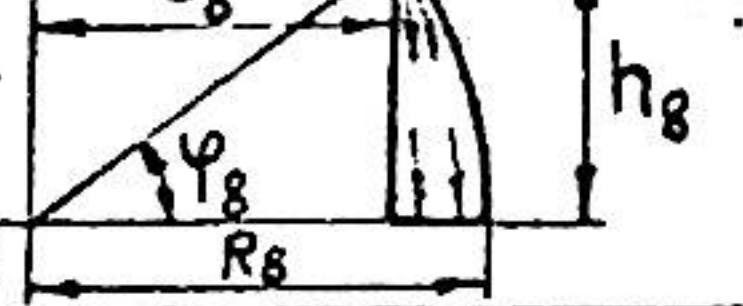
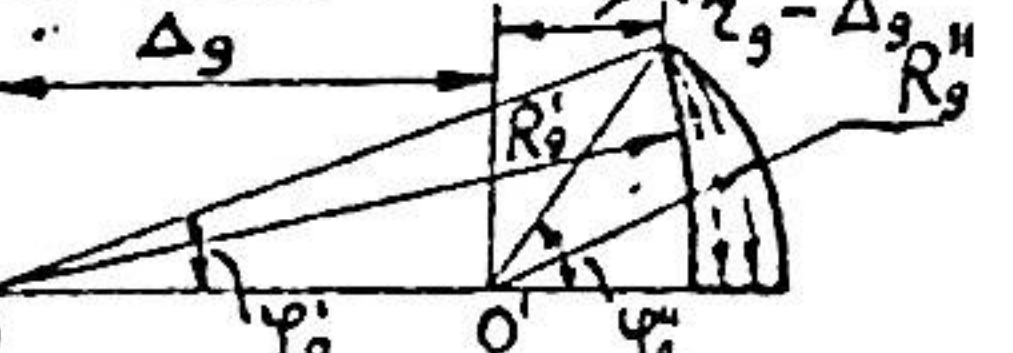
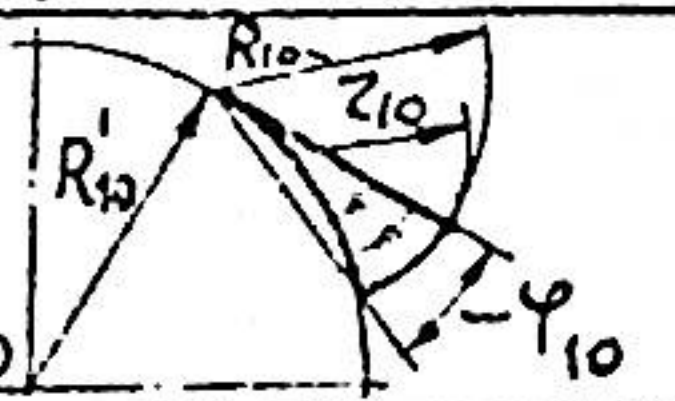
где dx и l_x - соответственно ширина и длина бесконечно узкой трубки потока рассматриваемой фигуры; C_{cp} и l_{cp} - средняя ширина и длина рассматриваемой фигуры в направлениях, перпендикулярном средней линии индукции и вдоль неё.

Используя формулы табл. I, можно вычислить удельные магнитные проводимости часто встречающихся на практике магнитных систем электрических аппаратов, приборов, и, в частности, применимы для исследуемой системы магнитного подвеса.

Как показали расчёты, расхождение величины проводимости, вычисленной по формулам табл. I, и проводимости, определённой по карти-

Значения удельных магнитных проводимостей простых фигур.

Таблица 1.

NN п/п	Тип фигуры	Назва- ние фигу- ры	Приближённое значение удель- ной магнитной проводимости	Точное зна- чение удель- ной магнит- ной прово- димости
1.		Прямо- уголь- ник	—	$\frac{a_1}{\delta_1}$
2.		Четверть кольца	По Буль О.Б. $\frac{4(R_2 - z_2)}{\pi(R_2 + z_2)}$	$\frac{2}{\pi} \ln \frac{R_2}{z_2}$
3.		Часть кольца	По Буль О.Б. $\frac{2(R_3 - z_3)}{\varphi_3(R_3 + z_3)}$	$\frac{1}{\varphi_3} \ln \frac{R_3}{z_3}$
4.		Чет- верть круга	$\frac{4}{\pi} = 1,272$	—
5.		Часть круга	$\frac{2}{\varphi_5}$	—
6.		Чет- верть круга	По Ротерсу 0,52	—
7.		Часть сектора	$\varphi_7 \left(\frac{1}{2} + \frac{z_7}{R_7 - z_7} \right)$	—
8.		Полу- сег- мент	По Буль О.Б. $1,335 \frac{R_8 - z_8}{h_8 + \varphi_8 R_8}$	—
9.		Полу- серп	По Буль О.Б. $1,335 \frac{R_9'' + \Delta_9 - R_9'}{\varphi_9' R_9' + \varphi_9'' R_9''}$	—
10.		Часть круга	$\frac{2}{\varphi_{10}}$	—
11.		Часть кольца	$\frac{(R_{11} - z_{11}) + R_{11}''(\alpha_{11}'' - \alpha_{11}')}{z_{11}' \varphi_{11}' + R_{11}' \varphi_{11}''}$	—

нам поля, снятым с помощью моделирования на электропроводной бумаге, не превышает 8-9%.

Расчёт магнитных цепей электромагнитных подвесов нами проводился комплексным методом.

Расчёт разбивается на два этапа: предварительный и уточненный.

На этапе предварительного расчёта производится определение размеров магнитной системы, параметров намагничивающей катушки.

При проектировании электромагнитных подвесов с авторегулированием приходится вести расчёт на заданную электромагнитную силу $F_{\text{э}}$. Кроме этого заданными величинами могут быть: напряжение U и частота источника питания f , плотность тока i_q , величина зазора δ_e . Выбираются величина индукции в рабочем зазоре B_e и коэффициент заполнения катушки f_n .

Суммарная величина электромагнитной силы двух полюсов П-образной системы магнитного подвеса для симметричного положения ротора равна

$$F_{\text{э}} = 2 \left(\frac{B_e}{5000} \right)^2 a_p b_p \quad \text{или} \quad F_{\text{э} \text{ ср}} = \frac{1}{2} F_{\text{э}} = \left(\frac{B_e}{5000} \right)^2 a_p b_p, \quad (22)$$

где расчётные размеры для граней a и b полюса определяются

$$a_p = a + \delta_e (g'_{\text{тб}} + g''_{\text{тб}} + g'_{\text{зб}} + g''_{\text{зб}}) = a + \delta_e g_{\text{тзб}}; \quad (23)$$

$$b_p = b + 2\delta_e (g_{\text{та}} + g_{\text{за}}) = b + 2\delta_e g_{\text{та}}. \quad (24)$$

Здесь $g'_{\text{тб}}$, $g''_{\text{тб}}$ и $g_{\text{та}}$ соответственно удельные проводимости выпучивания с рёбер торцевой поверхности граней b и a ; $g'_{\text{зб}}$, $g''_{\text{зб}}$, $g_{\text{за}}$ - соответственно удельные проводимости выпучивания с боковых граней b (внутренней и внешней) и a на высоте координат поля выпучивания z ; $g_{\text{тзб}}$ и $g_{\text{та}}$ - соответственно суммарные удельные проводимости выпучивания с рёбер торцевой поверхности и боковых граней b и a .

В случае, если строится картина поля вблизи воздушных зазоров, то)

$$a_p = \delta_e g_b; \quad (25)$$

$$b_p = 2\delta_e \cdot g_a. \quad (26)$$

Здесь полные удельные проводимости зазора и поля выпучивания с граней β и α будут:

$$g_\beta = \frac{m_\beta}{n_\beta}; \quad g_\alpha = \frac{m_\alpha}{n_\alpha}, \quad (27)$$

где m_β и m_α — соответственно число элементарных трубок с граней β и α ; n_β и n_α — соответственно число единичных квадратов в трубках с граней β и α .

Из уравнения (22) по заданным B_e и $F_{\Sigma p}$ определяется расчётное сечение полюса S_p . Далее, учитывая (23) и (24), получаем выражение для ширины полюса:

$$a = \frac{1}{2K_1} \left[-(2\delta_e g_{\tau\beta} + \delta_e K_1 g_{\tau\beta}) \pm \sqrt{(2\delta_e g_{\tau\beta} + \delta_e K_1 g_{\tau\beta})^2 - 4K_1 (2\delta_e^2 g_{\tau\beta} g_{\tau\alpha} - S_p)} \right] \quad (28)$$

Здесь коэффициент K_1 , учитывающий соотношение между размерами сечения сердечника α и β , равен:

$$K_1 = \frac{b}{a}. \quad (29)$$

В пятой главе выведено уравнение, позволяющее по заданным B_e , δ_e , f_n , i_q и η определить геометрию системы:

$$h_n^2 = \frac{B_e \delta_e}{\mu_0 f_n i_q \eta}, \quad (30)$$

где отношение длины намотки ℓ_n к высоте намотки h_n обозначено:

$$\eta = \frac{\ell_n}{h_n}. \quad (31)$$

В работе дан анализ уравнения (30) и приведены рекомендации по выбору отдельных величин.

Расчёт магнитного подвеса при заданной силе $F_{\Sigma p}$ рекомендуется проводить в следующем порядке:

- 1) По уравнениям (28) и (29) находим a и b с учётом поля выпучивания при выбранном δ_e и известном соотношении между $F_{\Sigma p}$ и B_e ;
- 2) Находим h_n и ℓ_n по формулам (30) и (31) при заданных B_e , δ_e , f_n , i_q , η .

3) Окончательные размеры магнитопровода получаем с учётом толщины каркаса Δ_k , свободного места между катушками $2\Delta_0$ и части сердечника ℓ_0 , не занятого катушкой.

При проектировании магнитных подвесов с резонансной цепью необходимо вести расчёт на заданные $F_{\Sigma p}$ и Q_0 . Кроме указанных заданных величин будут: U , f , материал магнитопровода, i_q , δ_e . Выбираются индукция в воздушном зазоре B_e и f_n .

В работе выведена зависимость, позволяющая в этом случае определить геометрию системы:

$$h_n^2 = \frac{B_e 2\delta_e \cos \alpha}{\sqrt{2} \mu_0 K_1 i_q f_n \eta} \left(\frac{p_z}{Q_0 p_x - p_R} + 1 \right). \quad (32)$$

В этом варианте расчёт подвеса рекомендуется проводить в следующем порядке:

1) По уравнениям (31) и (32) находят a и b с учётом поля выпучивания при выбранном δ_e и известном соотношении между $F_{\Sigma p}$ и B_e ; определяется

$$K_2 = \frac{a_p b_p}{ab}. \quad (33)$$

2) По формулам (32) и (31) вычисляются h_n и ℓ_n ;

3) Производится конструирование магнитопровода.

Уточнённый расчёт проводится с учётом всех факторов: магнитного сопротивления стали и воздушных зазоров, потерь на гистерезис и вихревые токи, выпучивания и рассеяния магнитного потока.

В работе приведены для сравнения две методики уточнённого расчёта.

В первой методике расчёт проводится комплексным методом по среднему значению потока.

Во второй методике в основу расчёта были положены схемы замещения (рис. 2), в которой в отличие от первой сделана попытка учесть не только потоки рассеяния между сердечниками, но и рассеяние вихревого поля катушки возбуждения.

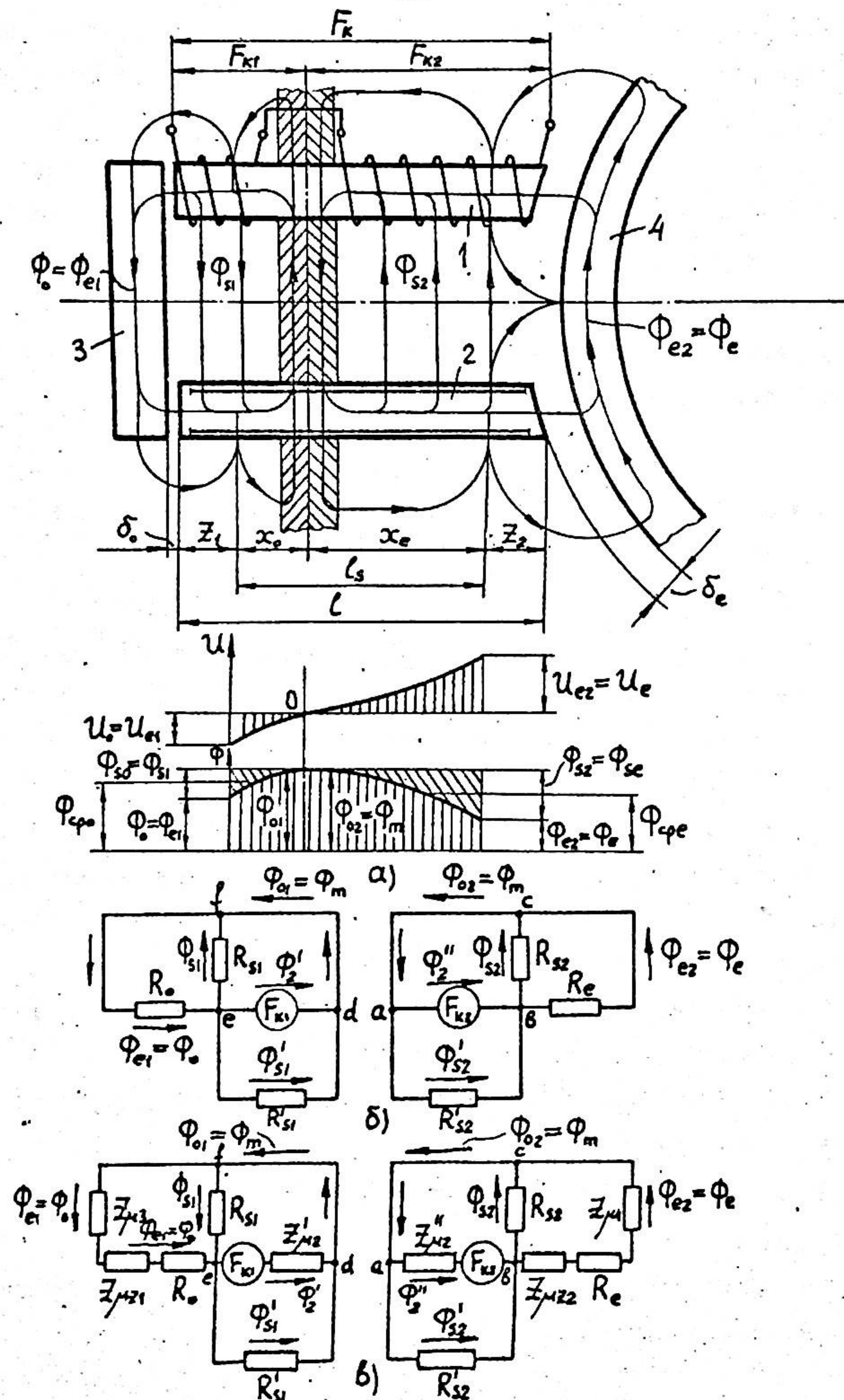


Рис. 2. Магнитная цепь с двумя воздушными зазорами и её схема замещения.

а - магнитная цепь; б - схема замещения без учёта сопротивления стали; в - схема замещения с учётом

Погрешность расчёта по второй методике оказалась на 2% выше, чем по первой. Однако вторая методика позволяет быстрее произвести расчёт и поэтому в ряде случаев она может быть применима.

В приложении 4 приведён пример расчёта магнитной цепи подвеса по схеме замещения, в приложении 5 - пример расчёта подвеса на заданные F_z и Q_o .

Глава 6.

Экспериментальные исследования и практические рекомендации по проектированию.

В этой главе дано описание экспериментальной установки, приведена методика измерения центрирующих сил и методика настройки подвеса. Проводится оценка погрешностей измерения и расчёта.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность полученных расчётных соотношений, закономерность изменения центрирующей силы от изменения напряжения питания, добротности, точки настройки подвеса, величины начального зазора, а также целесообразность предложенных методов расчёта проводимостей и магнитных цепей.

Кроме того, рассматриваются практические рекомендации по выбору основных параметров магнитных подвесов при их проектировании.

Обозначения основных величин даны в приложении 6.

Заключение.

1. В работе проведён анализ существующих принципов магнитных подвесов по данным отечественной и зарубежной технической литературы и предложены общая классификация магнитных подвесов и классификация подвесов на постоянных магнитах.

2. Получена аналитическая зависимости центрирующей силы. Прове-

дён её анализ для различных режимов работы магнитного подвеса и даны рекомендации по выбору: начального воздушного зазора; добротности катушек подвеса; напряжения и частоты питания; точки настройки подвеса и материала магнитопровода.

3. Экспериментально получены комплексные магнитные характеристики для сталей 3320, 344 и пермаллоя 50НП при частотах от 400 до 4800 гц, что расширяет область применения комплексного метода расчёта магнитных цепей переменного тока, и, в частности, дало возможность использовать его для магнитных цепей подвесов.

4. На основе моделирования на электропроводной бумаге получены картины поля, которые позволили достаточно быстро и с достаточной для практики точностью определить магнитные проводимости воздушных зазоров и рассеяния. Приведено обоснование моделирования в основной и двух вспомогательных плоскостях с введением искусственных границ.

Выведены аналитические выражения для магнитных проводимостей частичных объёмов на основе анализа картин поля.

5. Магнитное поле вблизи воздушного зазора подвеса трёхмерно и имеет сложное распределение. Для его расчёта, наряду с известными фигурами поля частичных объёмов, предложены ещё ряд фигур и выведены расчётные уравнения для магнитных проводимостей.

6. В работе предложены методики расчёта магнитной цепи подвеса на заданные добротность и электромагнитную силу. Расчёт в первом приближении позволяет определить геометрию магнитной цепи и катушки.

Во втором приближении даётся расчёт магнитной цепи подвеса с учётом вылучивания, рассеяния и потерь в стали по предлагаемой схеме замещения, а также по среднему значению потока или по методу активного четырёхполюсника. Указанные методы экспериментально проверены и дают погрешность не выше 12,5%. Наибольшую точность даёт аналитический метод расчёта по среднему значению потока ($\sim 8\%$).

7. В работе даны рекомендации по стабилизации подвешенного ротора магнитного подвеса, проведён расчёт собственных частот колебаний ротора и расчёт коэффициентов демпфирования для используемого индукционного демпфера.

8. Разработана и экспериментально исследована модель магнитного подвеса. Опытная проверка показала хорошее совпадение выведенных аналитических зависимостей с опытом и подтвердила выводы, полученные при аналитических исследованиях.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Буль Б.К., Гаврилов Г.Г., Классификация устройств, использующих принцип магнитного подвеса на постоянных магнитах и электромагнитах постоянного тока, Известия ВУЗов. Электромеханика, 1970, №7.

2. Гаврилов Г.Г., Электромагнитные радиально-упорные подшипники, Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-69г.г., М., МЭИ, 1969.

3. Буль Б.К., Гаврилов Г.Г., Основное условие функционирования магнитного подвеса с резонансной цепью, Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции, ИЭИ, г.Иваново, 1971г.

4. Гаврилов Г.Г., Уравнение центрирующей силы в магниторезонансном подвесе, Тезисы докладов итоговой научно-технической конференции, ИЭИ, г.Иваново, 1971.

5. Буль Б.К., Буль О.Б., Гаврилов Г.Г., Исследование системы магнитного подвеса с помощью моделирования на электропроводной бумаге, Известия ВУЗов. Электромеханика, 1971, № 4.

6. Буль Б.К., Гаврилов Г.Г., К определению удельной проводимости простых фигур, Труды МЭИ (в печати).

7. Буль Б.К., Иоффе А.И., Гаврилов Г.Г., Опытное определение составляющих комплексного магнитного сопротивления некоторых магнитных материалов, Известия ВУЗов. Электромеханика, (в печати).

8. Гаврилов Г.Г., Применение магнитной подвески в различных отраслях техники, Технический отчёт МЭИ, М., 1968 (рукопись).

9. Гаврилов Г.Г., Магнитная подвеска в электромагнитном поле, Технический отчёт МЭИ, М., 1969 (рукопись).

10. Гаврилов Г.Г., Расчёт магнитных цепей электромагнитных подвесов, Технический отчёт МЭИ, М., 1970 (рукопись).

По результатам работы сделаны доклады:

1. На научно-технической конференции в МЭИ в 1969г.

2. На итоговой научно-технической конференции Ивановского энергетического института в 1971г.

3. На заседании научно-технической секции отделения контактной аппаратуры управления Всесоюзного научно-исследовательского института релейстроения (г.Чебоксары) в 1971г.