На правах рукописи

КОЛТУНОВ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ

КВАЗИБЕССИЛОВЫЕ НЕРАЗРУШАЕМЫЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХСИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2004

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Прогресс физики и техники магнитных полей предельной напряженности, помимо общенаучного интереса, представляется существенным также и для дальнейшего развития многих разделов современной науки и технологии, поскольку такие поля позволяют получать огромные концентрации энергии. Достаточно отметить, что давление, создаваемое магнитным полем с индукцией в 1000 Тл, составляет около 4 млн. атм., то есть превосходит давление в центре Земли и соответствует плотности энергии $4 \cdot 10^{11}$ Дж/м^3. Отсюда очевидна важность использования сильных и сверхсильных магнитных полей в решении проблем термоядерного синтеза и физики плазмы, астрофизики и геофизики, физики твердого тела и ядерной физики, а также в ряде других задач физики энергии высоких плотностей, где сильные и сверхсильные магнитные поля являются важным, а порой и единственным «инструментом» исследования. Кроме того, интересны и технологические приложения сильных магнитных полей: магнитно-импульсная обработка металлов, высокоскоростное ускорение макротел в сильном магнитном поле (исследования поведения материала в условиях импульсного нагружения, привода механизмов быстродействующих выключателей и устройства быстрого напуска газа), сепарация материалов и другие.

Ряд важных открытий современной физики тем или иным образом связан с магнитными полями. Поскольку новые эффекты часто удается обнаружить после расширения диапазона измерений основного экспериментального параметра, предпринимаются постоянные попытки разработки и изготовления все более сильных магнитов.

Существуют различные способы достижения сверхсильных импульсных магнитных полей. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с генерацией магнитного поля в неразрушаемых системах, которые являются наиболее удобными для проведения научных исследований и технологического применения.

Получение сверхсильных импульсных полей в таких системах остается актуальной задачей, несмотря на многолетнюю историю работ в указанной области. Сейчас устойчиво и надежно работают многовитковые магниты с полем масштаба 60-70 Тл, в ряде стран ведутся усиленные разработки соленоидов с полем 100 Тл, тогда как еще в 20-х годах в пионерских работах П.Л. Капицы было получено поле с индукцией около 30 Тл. Такой сравнительно медленный прогресс обусловлен огромными трудностями, связанными, главным образом, с нагревом и с обеспечением механической прочности обмотки. Сокращение длительности импульса, а в перспективе – применение сверхпроводящих материалов с высоким значением

критической индукции магнитного поля позволяют уменьшить ограничения, накладываемые нагревом. Поэтому механическую прочность можно рассматривать как основной фактор, ограничивающий уровень полей, получаемых без разрушения соленоидов.

Применение равнонагруженных по радиусу обмоток, у которых существует только азимутальная составляющая плотности тока, позволяет, в принципе, снять эту проблему. Однако существенное снижение механических напряжений в такой обмотке по сравнению с пределом ее прочности (максимально допустимым напряжением σ_0) возможно лишь за счет экспоненциально большого роста отношения внешнего радиуса обмотки к внутреннему: $R_2/R_1 \approx \exp(B_0/B_м)^2$, где $B_м=(2\mu_0\sigma_0)^{1/2}$ - “магнитный предел прочности”, B_0 - индукция на оси соленоида. Для материала с $\sigma_0=10^9$ Па ($B_м$=50 Тл) это отношение составляет 55 если B_0=100 Тл, и возрастает до значения $8\cdot10^3$ при B_0=150 Тл. Из приведенных оценок следует, что для получения поля с индукцией 100 - 150 Тл и выше следует искать другие пути решения данной проблемы. В качестве радикального средства преодоления указанных ограничений и предлагается рассмотреть возможность реализации магнита с резко ослабленными механическими напряжениями, в основе создания которого лежит идея применения магнита с квазибессиловой обмоткой, уравновешенной внешним азимутальным полем.

Цель работы – научное обоснование метода генерации сверхсильного магнитного поля с помощью неразрушаемых квазибессиловых систем. Подтверждение численными расчетами резкого снижения механических усилий в таких системах и возможности получения поля с индукцией масштаба 100 Тл при использовании доступных материалов. Разработка практических рекомендаций по созданию конкретной магнитной системы с квазибессиловой обмоткой.

Научная новизна

1. Впервые предложена и развита концепция квазибессилового магнита, позволяющего создавать поля мегагауссного диапазона при использовании доступных материалов и источников энергии.

2. Рассмотрены способы реализации квазибессиловой области магнита. Сделаны оценки механических напряжений и произведен выбор наиболее эффективного способа – формирование слоев обмотки токами переменного направления. Исследовано влияние отклонений, которые могут возникнуть при реализации квазибессиловой области. Разработана методика выбора радиусов слоев в зоне обратного тока, удовлетворяющих условиям равнонагруженности и обеспечивающих минимальные радиальные размеры системы.

3. Выполнен тепловой расчет, показано влияние на нагрев параметров системы и разработаны способы его снижения.

4. Представлена методика выбора конфигурации торцевых частей магнита и токараспределения, обеспечивающих минимизацию механических напряжений в этой области.

5. Предложен способ согласования магнитной системы с емкостным накопителем энергии. Разработана и при участии автора создана первая модель соленоида с квазибессиловой обмоткой, предназначенная для исследований и экспериментальной проверки предложенного метода снижения сил.

Положения, выносимые на защиту

1. При специальном выборе распределения токов и конфигурации обмотки возможно резкое снижение механических напряжений, действующих на элементы конструкции магнитной системы. Удержание обмотки возможно с помощью азимутального поля, что позволяет существенно уменьшить радиальные размеры системы при неизменных прочностных характеристиках по сравнению с традиционными конструкциями равнонагруженных магнитных систем.

2. Численное моделирование методом конечных элементов подтверждает аналитические оценки снижения напряжений, работоспособность методик по выбору токораспределения в слоях обмотки и возможность создания системы с дополнительным торцевым экраном.

3. Разработанная экспериментальная модель подтверждает возможность реализации квазибессиловой обмотки на доступном уровне технологии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IX и X международных конференциях по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам (Megagauss IX – Россия, Москва–Санкт-Петербург, июль 2002г., Megagauss X – Germany, Berlin, июль 2004г.); на VII международном симпозиуме по исследованию в сильных магнитных полях (France, Toulouse, июль 2003г.); на международном семинаре по гидродинамике высоких плотностей (Россия, Новосибирск, август 2003г.).

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка литературы, включающего 51 наименование, и приложения. Она содержит 198 страниц текста, 55 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены способы создания и уровень достигнутых магнитных полей в зависимости от метода их получения. Показаны основные ограничения в генерации магнитных полей в неразрушаемых системах и сформулирована цель работы.

В первой главе рассмотрены применение и способы создания сильных импульсных магнитных полей в неразрушаемых системах и обоснована актуальность работы. Предложен принцип устройства магнита с квазибессиловой обмоткой и представлены задачи, которые необходимо решить для достижения цели.

Конструкция предлагаемой системы с квазибессиловой обмоткой, уравновешенной азимутальным полем, схематически показана на рис.1. В основу её создания положены два принципа: создание обмотки с полем, близким к бессиловому («квазибессиловая обмотка») и минимизация механических напряжений во внешней зоне магнита, где замыкается полоидальный ток. Близкое к бессиловому поле в зоне 1 создается дискретными проводниками с азимутальными δ_φ и полоидальными δ_p компонентами тока. Полоидальный ток замыкается во внешней области 2, где поле не является бессиловым. В зоне 2 индукция магнитного поля имеет лишь азимутальную составляющую B_φ, а полоидальный ток только осевую δ_z. Рабочее поле B_0 создается в объеме, ограниченном внутренним радиусом квазибессиловой обмотки R_0. Толщина квазибессиловой области – $d=R_1-R_0$. Так как бессиловое поле возможно лишь при непрерывном токораспределении, то такую магнитную систему, в которой область, близкая к бессиловой, состоит из дискретных проводников, естественно назвать квазибессиловой. При этом механические напряжения в этой части обмотки резко снижены по сравнению с традиционными системами, но не полностью исключены.

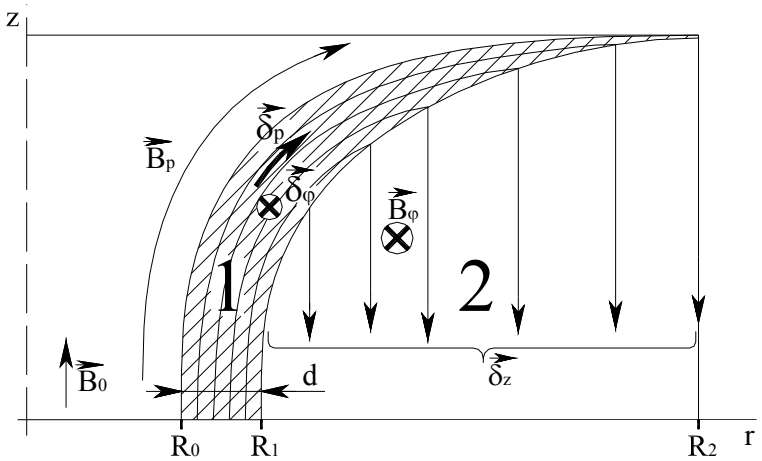

Рис.1 Схематическое изображение соленоида конечной длины с квазибессиловой обмоткой - (1) и зоной обратного тока - (2).

Если в зоне 2 ток распределен так, что в ней выполнено условие равномерной нагрузки, то в этой системе имеет место следующая зависимость для отношения радиусов соленои-

да: $R_2/R_1=((2B_0^2/B_м^2)+1)^{1/2}$. Из приведенной формулы следует, что в среде с $\sigma_0=10^9$ Па, $R_2/R_1=3$ при создании поля с индукцией 100 Тл, и $R_2/R_1=5{,}8$ при $B_0=200$ Тл. Также видно, что, при условии $d<<R_2-R_1$ и $B_0^2/B_м^2>>1$, отношение внешнего R_2 и внутреннего R_0 радиусов магнита будет пропорционально отношению $B_0/B_м$.

Приведенные соотношения позволяют утверждать, что комбинация бессиловой и равнонагруженной областей в такой конструкции снимает проблему катастрофического роста размеров магнита при достижении полей с индукцией, превышающей магнитный предел прочности материала (т.е. удовлетворяющей условию $B_0>B_м$) и дает принципиальную возможность достижения величин магнитного поля значительно выше, чем существуют на сегодняшний день в неразрушающихся системах.

Во второй главе представлены способы токораспределения в средней плоскости системы в случае, когда влиянием торцов можно пренебречь. Приведены два способа реализации квазибессиловой области, соответствующих минимизации механических напряжений, и изложен метод выбора расположения токовых слоев в зоне обратного тока, обеспечивающий равнонагруженность и, следовательно, минимизацию радиальных размеров системы.

Для обоих случаев исполнения квазибессиловой области системой токовых слоев получены системы уравнений, связывающие их основные параметры: внутренний радиус - r_n, толщину слоев - Δ, плотность соответствующего тока - δ_n и интегральную силу - $F_{max}=\int f dr$ (f – объемная электромагнитная сила), близкую к возникающим механическим напряжениям - σ_0, и приведены результаты их численного решения.

В первом случае реализации квазибессиловой области обмотка состоит из N пар чередующихся слоев с ортогональными токами в каждой паре (рис.2). Слои разделены изоляционными прокладками. Распределение аксиальных и азимутальных токов, аппроксимирующее бессиловое токораспределение, производится таким образом, чтобы в каждой паре растягивающее усилие F_{r1}, воздействующее на внутренний кольцевой виток 1 с азимутальным током, было уравновешено сжимающей силой F_{r2}, действующей на находящийся снаружи слой 2 с аксиальным током. При этом каждая пара находится в равновесии, а изоляционная прокладка 3 подвержена сжатию. Кроме того, сжимающие усилия, возникающие в изоляционной прокладке, для каждой пары должны быть одинаковы.

При такой реализации квазибессиловой области напряжения, возникающие в изоляционных прослойках, равны: $\sigma_0=B_0^2/(2\mu_0 N)$, где N – число пар слоев обмотки; B_0 – индукция, создаваемая системой в рабочей зоне. Приведенная формула показывает, что напряжение в рассматриваемой системе в N раз меньше, чем магнитное давление, соответствующее полю на оси соленоида. В работе также были получены аналитические формулы для случая, когда

членами порядка Δ/r и $1/N$ можно пренебречь. При этом распределение реальной индукции, имеющее форму ломаной линии, аппроксимируется непрерывной дифференцируемой кривой. Такая методика удобна при выборе токораспределения, удовлетворяющего тем или иным требованиям. После нахождения «сглаженного» распределения индукции или соответствующего ему распределения тока можно оценить напряжения в реальной дискретной системе слоев. Хотя точные значения напряжений и токов в слоях могут быть найдены путем численного решения системы уравнений, приближенные решения для сглаженных зависимостей представляют интерес, поскольку в ряде случаев они могут быть получены аналитически. Так, например, в работе были получены распределения токов для системы, в которой слои равнонагружены (при этом возникают минимальные напряжения, равные в каждой токовой паре: $\sigma_0=B_0^2/(2\mu_0 N)$), и для системы, где азимутальные токи одинаковы в каждой из пар токовых слоев (максимальные напряжения возникают на внутреннем слое: $\sigma_0=B_0^2/(\mu_0 N)$).

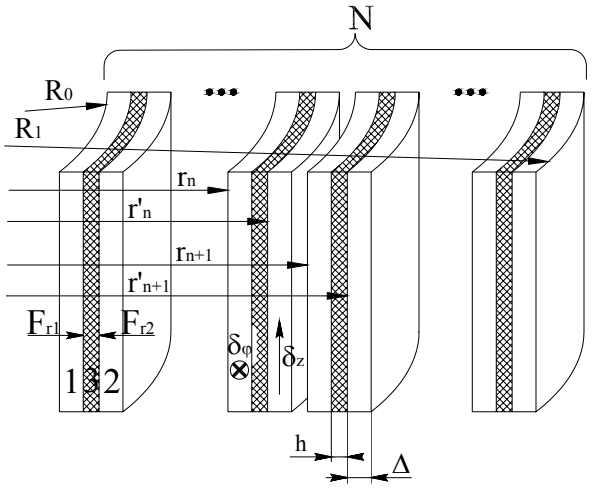

Рис.2 Структура квазибессиловой обмотки с парами уравновешенных токовых слоёв.

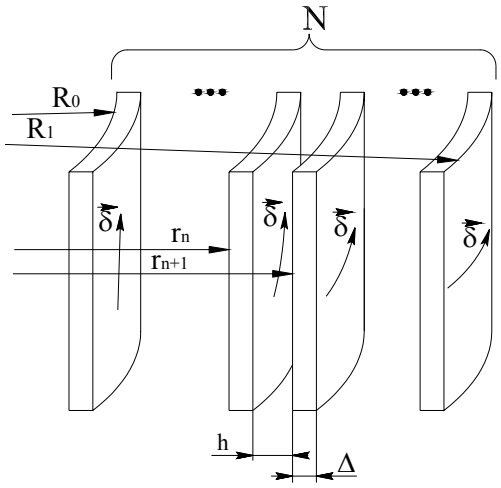

Рис.3 Структура квазибессиловой обмотки со слоями с токами переменного направления.

Во втором случае реализации квазибессиловой области аппроксимация токораспределения осуществляется в виде системы токовых слоев с дискретно изменяющимся направлением тока (рис.3). Величины и наклон токов выбираются так, что слои находятся в равновесии, и интегральная сила F_{max}, приводящая к сжатию самого слоя, в каждом слое одинакова. Такая система больше приближена к бессиловой, поскольку в ней обе составляющие тока не разнесены в пространстве и более близки к непрерывному изменению тока.

Напряжения, возникающие в случае применения слоев с токами переменного направления, ослабевают более чем в N^2 по сравнению с магнитным давлением и составляют величину порядка: $\sigma_0 \approx B_0^2/(2\mu_0 N^2)$. Это дает значительное преимущество по сравнению с реализацией парами токоведущих слоев, где механические напряжения пропорциональны

1/N, и позволяет создать систему с меньшим количеством слоев, что резко упрощает ее конструкцию.

В качестве примера, показывающего эффективность системы с токами переменного направления, в работе выполнен расчет трехслойного магнита с индукцией B_0=100 Тл. Механические напряжения в таком магните должны быть близки к $B_0^2/(2\mu_0 N^2)$=400 МПа, в то время как в современных конструкциях используются проводящие материалы с допустимым пределом прочности свыше 900 МПа. Результаты численного расчета для системы с внутренним радиусом R_0=20 мм, толщиной токопроводящих слоев Δ=1 мм и толщиной изоляции между слоями $d_{из}$=3 мм приведены в таблице 1 (α_n – угол наклона токовых линий, δ_Σ – суммарная плотность тока в слоях, $I_n=\delta_{z,n}\pi(2r_n+\Delta)\Delta$ – полный ток, подводимый к слою).

Таблица 1

Результаты расчета трехслойной квазибессиловой обмотки с токами переменного направления (R_0=20 мм, Δ=1 мм, $d_{из}$=3 мм)

N	r_n, мм	$\delta_{\varphi,n}$, 10^9 А/м^2	$\delta_{z,n}$, 10^9 А/м^2	δ_Σ, 10^9 А/м^2	α_n ^{0}	$B_{z,n}$, Тл	$B_{\varphi,n}$, Тл	F_{max}, 10^6 Па	I_n, 10^6 А
1	20	11.0	40.6	42.0	15.3	100	0	276	5.22
2	24	28.6	31.3	42.4	43.4	86.2	43.5	276	4.82
3	28	40.0	12.7	42.0	72.3	50.3	71.7	276	2.28

Аналитические расчеты показали, что напряжения (радиальные и азимутальные), возникающие в слоях малой кривизны, близки к величине F_{max}, и, следовательно, составляют примерно $\sigma_0 \approx F_{max}=276\cdot10^6$ Па (см. таблицу 1), что меньше оценки 400 МПа.

Механические напряжения, рассчитанные из аналитических формул, были сравнены с напряжениями, полученными из расчета методом конечных элементов (МКЭ) по известному закону изменения объемной силы в слое. Проведенный анализ показал отличие в значении напряжений, полученных двумя способами, около 1% и подтвердил применимость МКЭ в более сложных случаях, когда аналитические формулы не могут быть использованы.

Все механические расчеты были выполнены в программе ANSYS в лаборатории вычислительной механики СПбГПУ. Расчет МКЭ позволил оценить общую картину напряженного состояния не только отдельных, но и механически связанных («залитых») слоев, и исследовать влияние механических характеристик материала токовых слоев и межслойной изоляции на распределения механических напряжений в обмотке. Такой подход в моделировании механических напряжений позволил также оценить влияние точности укладки проводов в слоях и показал сниженную чувствительность монолитной залитой системы, что предполагалось из расчета по аналитическим формулам. При дальнейшей разработке анализ

МКЭ позволил автоматизировать расчет механических напряжений во всем продольном сечении соленоида в условиях осевой симметрии системы.

Следующей задачей, после выбора способа реализации квазибессиловой области, стала разработка методики выбора радиуса токовых слоев в зоне обратного тока. Разработанный метод позволил рассчитать по известным токам I_n, полученным из расчета квазибессиловой области, радиусы слоев, обеспечивающих равнонагруженность удерживающих цилиндров, и минимизировать радиальные размеры системы. Результаты расчета для зоны обратных токов при допустимом азимутальном напряжении равном [σ]=400 МПа приведены в таблице 2, rb_n и $rb_{ext,n}$ – соответственно, внутренний и внешний радиусы удерживающего бандажа слоя n. Радиальная сила P_n, действующая на каждый обратный токовый слой и направленная наружу, определялась расположением слоя и током I_n. В расчетах предполагалось, что давление P_n, оказываемое слоем, полностью воспринималось бандажом и принималось равномерно распределенным по его внутреннему радиусу.

Таблица 2

Значения радиусов удерживающих бандажей в зоне обратного тока при допустимом азимутальном напряжении равном [σ]=400 МПа

N	I_n, 10^6 А	P_n, 10^6 Па	rb_n, 10^{-3} м	$rb_{ext,n}$, 10^{-3} м
1	5.22	20.9	145	153
2	4.82	92.2	114	144
3	2.28	180	70	113

Так как в этой зоне азимутальные напряжения значительно превосходят радиальные, то предполагается, что эквивалентные напряжения в бандажах будут практически одинаковыми и близкими к [σ]. Величина выбранного [σ]=400 МПа примерно соответствует тому напряжению, которое имеет место в элементах квазибессиловой обмотки в центральной зоне. Схема расположения слоев в средней плоскости и распределения механических напряжений представлены на рис.4.

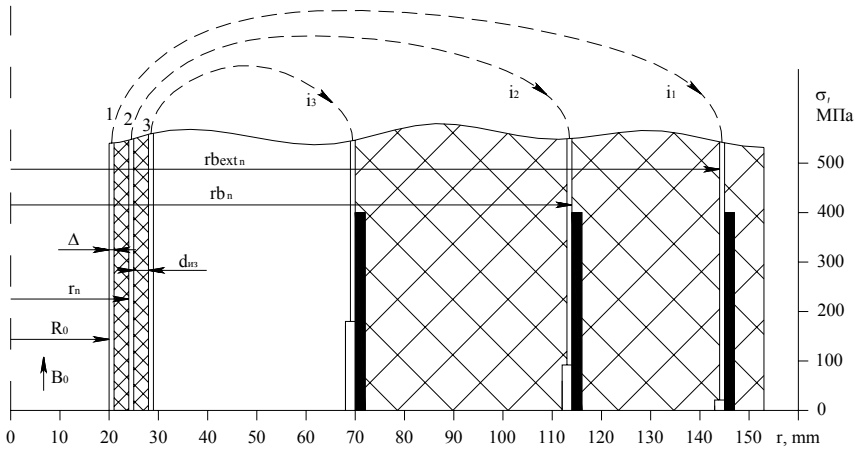

Рис.4 Схема расположения токовых слоев в средней плоскости и распределение максимальных значений напряжений в зоне обратного тока:

■ – азимутальные напряжения;

□ – радиальные напряжения.

Проведенные расчеты показывают, что во всей средней плоскости магнита при реализации квазибессиловой области тремя слоями с токами переменного направления можно обеспечить уровень напряжений около 400 МПа при получении поля с индукцией 100 Тл.

В третьей главе рассмотрены ограничения, возникающие вследствие выделения тепла при протекании тока. Особенность системы уравновешенных токовых слоев состоит в том, что механический предел прочности не зависит от толщины проводников. Последняя должна быть выбрана по условиям нагрева. Расчеты были выполнены в предположении, что каждый слой представляет собой сплошной цилиндр толщиной Δ и имеет постоянное удельное сопротивление ρ. При таком предположении получены точные формулы для определения условий минимального приращения объемной плотности энергии в токопроводящих слоях. Минимум энерговыделения соответствует режиму слабовыраженного скин-эффекта, когда справедлива приближенная формула:

$$\Delta q \approx B_0^2\pi^3/(16\mu_0 N^2)\cdot(1/k)^2 + B_0^2\pi^2/(4\mu_0)\cdot k^2 ,$$

где Δq – объемное энерговыделение за время разряда, $k=\Delta/\Delta_0$ – отношение толщины проводящего слоя к толщине скин-слоя, $\Delta_0=[\rho T/(\mu_0\pi)]^{1/2}$ – толщина скин-слоя, T – период колебаний тока, импульс которого имеет форму одного полупериода синусоиды. Здесь первый член описывает нагрев собственным током, а второй – наведенным, с учетом влияния скин-эффекта. Полученные точные и приближенные (помечены штрихом) зависимости энерговыделения представлены на рис.5: кривая 1 и 2 – соответственно, нагрев собственным и наведенным токами, 3 – суммарный нагрев.

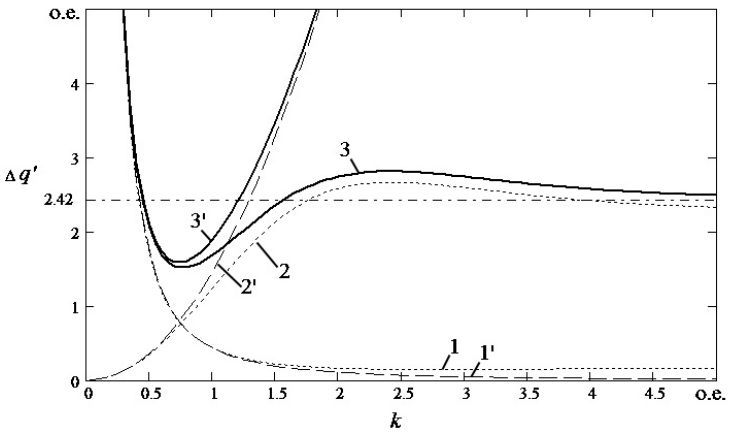

Рис.5 Зависимости относительного энерговыделения ($\Delta q'=2\mu_0\Delta q/B^2$) для N=3.

Минимуму нагрева соответствует условие $k\approx[\pi/(2N)]^{1/2}$, при этом минимальная плотность выделенной энергии $\Delta q_{min}=\pi^2 B_0^2/(4\mu_0 N)$. Для системы с N=3, B_0=100 Тл значение Δq_{min} составляет $6\cdot10^9$ Дж/м^3, что недопустимо велико. Поэтому число слоев должно быть увеличено в 6 или 4 раза для, соответственно, двух допустимых значений [Δq]: $1.1\cdot10^9$ Дж/м^3 (нагрев меди от 300^{0}К до 600^{0}К) или $1.7\cdot10^9$ Дж/м^3 (нагрев от 77^{0}К до 600^{0}К). Так, при числе слоев N=18, $k_{опт}$=0.295 и $q_{min}=1.1\cdot10^9$ Дж/м^3. Учет дискретной реализации слоев проводами кругового сечения дал схожие результаты и подтвердил, что тепловые ограничения в такой системе требуют использования большего числа слоев, чем прочностные.

Тем не менее, число слоев обмотки может быть уменьшено, если скин-эффект исключен путем применения транспонированных проводников. В этом случае справедливо оценочное соотношение

$$T/d^2 \leq S_0 \cdot [4\mu_0/(\pi B_0)]^2 ,$$

где d – суммарная толщина слоев ($d=N\Delta$), $S_0=(\delta_m T)/4$ – допустимое значение интеграла действия, рассчитанное для случая, когда плотность тока изменяется по закону $\delta=\delta_m \sin(2\pi t/T)$ при $t<T/2$, $\delta=0$ при $t> T/2$.

Для оценок можно принять $S_0=3{,}6\cdot 10^{16}$ $A^2c^2м^{-4}$, что для меди соответствует $\Delta q\approx 1.1\cdot 10^9$ $м^3$/Дж. Например, для $B_0=100$ Тл и N=3 толщина слоя, соответствующая условию отсутствия перегрева при T=83 мкс будет равна $\Delta=1$ мм, а при T=500 мкс будет равна $\Delta=2.45$ мм. Таким образом, решением, позволяющим преодолеть тепловые ограничения, является применение транспонированных проводников. Это позволяет использовать число слоев, полученное из условий механической прочности.

В четвертой главе показаны условия разгрузки торцевой части квазибессилового магнита, рассмотрена возможность его реального исполнения и способа согласования с емкостным накопителем энергии.

Особенностью квазибессиловой обмотки является ее сложная геометрическая форма. В идеальном случае в бессиловой обмотке (область 1, рис.1) должно выполняться условие параллельности векторов плотности тока и индукции. Задачу выбора ее конфигурации целесообразно рассматривать в нескольких приближениях. Они отражают иерархию расчетных моделей, которые используются при выборе формы проводящих слоев и расположения на них проводников. Наиболее простым для анализа является предельный случай обмотки исчезающе малой толщины с дополнительными экранами (например, рис.6), вытесняющими магнитное поле при резком скин-эффекте. Однако даже в таком приближении рассматриваемая проблема является примером нелинейной некорректной задачи, когда граничных условий больше, чем необходимо для получения единственного решения.

Использование экранов, регулирование токосъема и вариация формы обмотки позволяют обеспечить отсутствие нормальной компоненты индукции на границе слоя – $B_n(M)=0$ и интегральное условие равновесия – $B_p(M)=B_\varphi(N)$. В отсутствии экранов конфигурация слоя может быть построена при условии, что на его границе выполняется приближенное равенство $rB_p\approx const$ на участке ab, а за пределами этого участка произведение rB_p убывает, рис.6. При этом условие равновесия может быть выполнено, если непрерывно отводить избыточный ток с участка bc. Дополнительные слабонагруженные экраны позволяют произвести коррекцию поля, если равенство индукций $B_p(M)$ и $B_\varphi(N)$ нарушается. В примере на рис.6

равновесие границы вдали от оси выполняется, если ток не отводится, поле не проникает в экран и выполнено условие $h=R_0/2$.

Приведенная система с плоским торцевым экраном, как наиболее простая для расчета и реализации, была выбрана для оценки возможности создания магнита на 100 Тл и для изготовления модельного соленоида. В работе показан способ выбора конфигурации и токораспределения в слоях, обеспечивающий их равновесие и приведен пример, который показывает возможность исполнения трехслойного магнита с полем 100 Тл в системе с экраном. Во всех частях такого магнита (включая удерживающие экран элементы) механические напряжения не должны превышать 400 МПа. При этом модель осесимметричной обмотки нулевой толщины использовалась как первое приближение для расчета многослойного квазибессилового магнита. Это позволяет найти формы уравновешенных токовых слоев и рассчитать распределение полоидальной и азимутальной компоненты плотности тока по слоям. Далее непрерывное по углу распределение тока заменялось системой дискретных проводников. Результат такого построения для трехслойного соленоида представлен на рис.7 и рис.8. Для наглядности каждый слой с изображением четырех токовых линий показан раздельно.

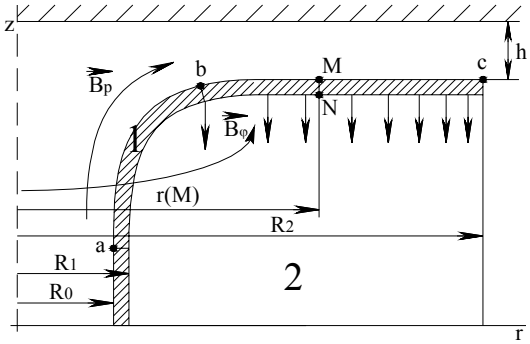

Рис.6 Тонкая обмотка с непроницаемым экраном и распределенным токоотводом.

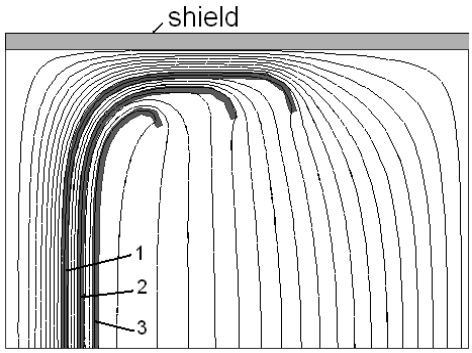

Рис.7 Линии потока полоидального поля.

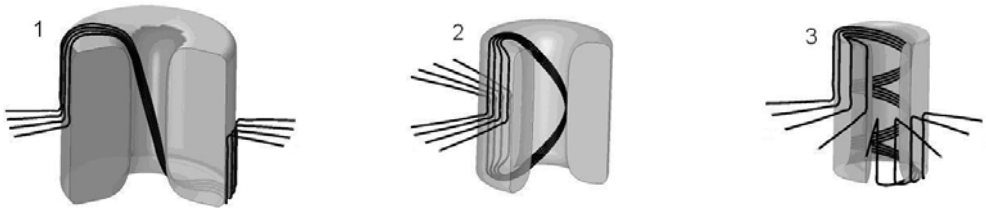

Рис.8 Конфигурации проводников в слоях магнита (1,2,3 – слои соленоида).

Расчет распределения индукции и построение линий потока полоидального поля позволяет оценить правильность методики выбора распределения азимутальных токов в слоях и оценить силу, действующую на экран. В работе показана возможность снижения нагрузки на шпильки, удерживающие экран, за счет инерционных эффектов, путем увеличения массы конструкции экран–шпильки с помощью дополнительного груза.

Квазибессиловой магнит является сложной многовитковой многослойной системой, поэтому для задания необходимых токов и обеспечения требуемого периода разряда был разработан способ ее согласования с источником энергии (емкостным накопителем). Для известной геометрии слоев и распределения токов были найдены взаимные M_{nk} и собственные L_n индуктивности в приближении одновиткового исполнения слоев. При этом каждый слой рассматривался как последовательное соединение одновитковых соленоидов, образующих, соответственно, полоидальное и тороидальное поля. Свободным параметром, позволяющим регулировать и получать необходимый период разряда T и токи I_n, является число витков в слоях. Разработана методика выбора числа витков каждого слоя и расчета дополнительных индуктивностей La_n, подключаемых к слоям обмотки для коррекции токов в параллельно соединенных слоях.

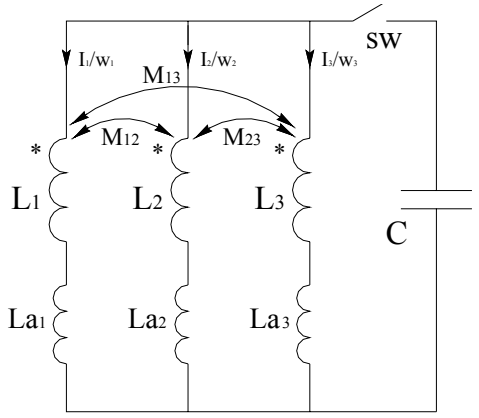

Рис.9 Эквивалентная схема соленоида.

Эквивалентная схема трехслойного соленоида показана на рис.9. Электрический расчет позволяет оценить характерные электрические параметры системы и выбрать необходимое число витков в слоях. Надо отметить, что уложенные по сложным траекториям провода должны не только давать возможность образовывать заданное число витков, но и обеспечивать максимальный коэффициент заполнения обмотки.

В пятой главе описана первая натурная модель квазибессилового магнита и приведены некоторые результаты начатых на ней экспериментов. Цель создания этой модели состоит в том, чтобы путем сравнения результатов компьютерных расчетов и экспериментов подтвердить концепцию квазибессилового магнита, развитую в работе. Одновременно при создании модели впервые решались вопросы технологии изготовления обмоток, имеющих сложную пространственную конфигурацию. Модель создана в лаборатории ТВН СПбГПУ и изготовлена из малопрочных и технологичных материалов и не рассчитана для работы в сильных полях (ее предельное поле ограничено значением около 20 Тл). Уровень поля выбирался достаточным для экспериментального подтверждения эффектов резкого снижения усилий в уравновешенных токовых слоях.

Модельный соленоид имеет трехслойную обмотку (N=3) и плоский торцевой экран, рис.10. В каждом слое на участках $a_k b_k$ витки уложены под определенным углом к оси z, а на цилиндрических поверхностях $b_k c_k$ – параллельно оси z. Три участка $a_k b_k$ образуют часть обмотки, где создаются две компоненты индукции: B_p (полоидальная) и B_φ (тороидальная).

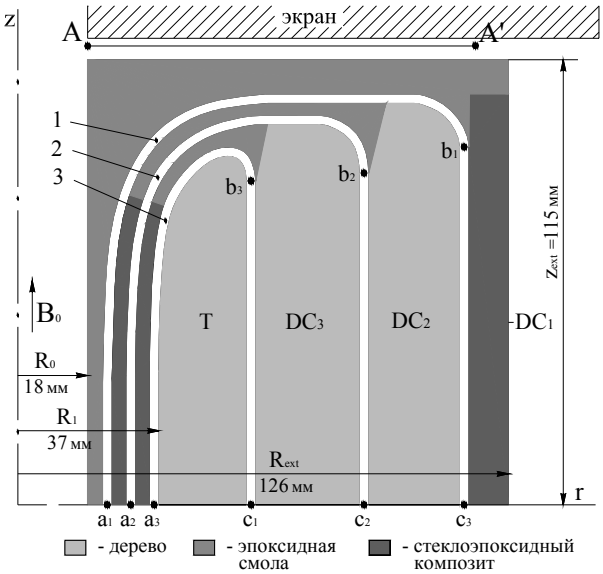

Рис.10 Расчетная модель соленоида.

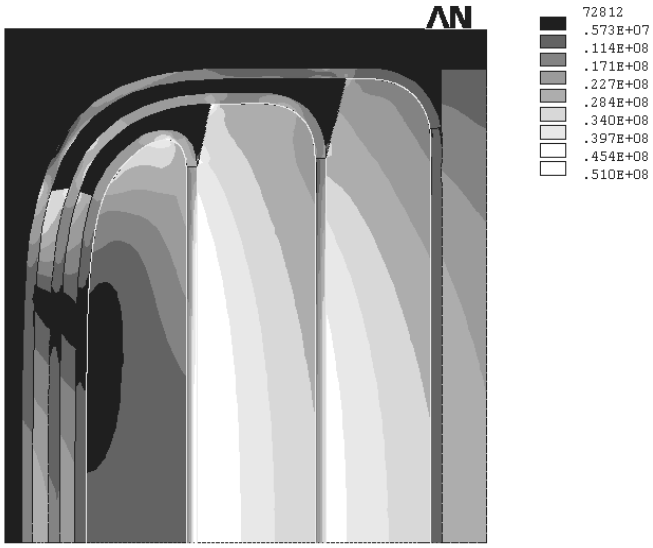

Рис.12 Распределение эквивалентных напряжений.

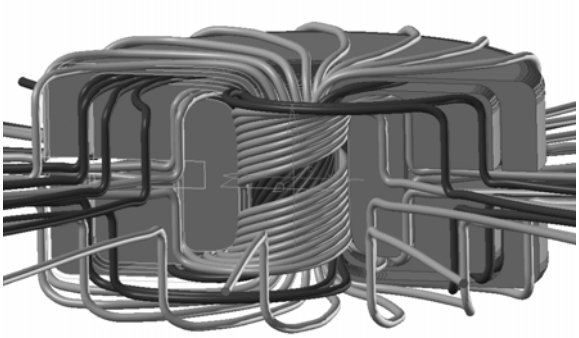

Рис.11 Расположение проводов в трехслойном магните (часть удалена).

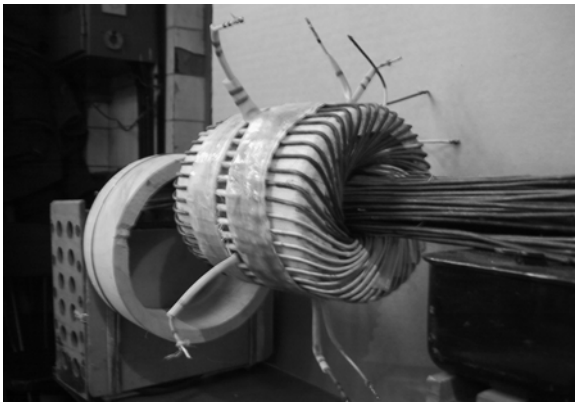

Рис.13 Формирование слоев системы.

Таблица 3

Расчетные и измеренные (показаны в скобках) индуктивности эквивалентной схемы (рис.9) модельного квазибессилового магнита

L_1=8.49 мкГн (9.15)	M_{12}=5.5 мкГн (6.33)	La_1=10.5 мкГн (6.56)
L_2=7.67 мкГн (8.75)	M_{13}=3.64 мкГн (4.62)	La_2=8.74 мкГн (4.74)
L_3=22.1 мкГн (21.3)	M_{23}=8.24 мкГн (9.24)	La_3=0.42 мкГн (0.10)

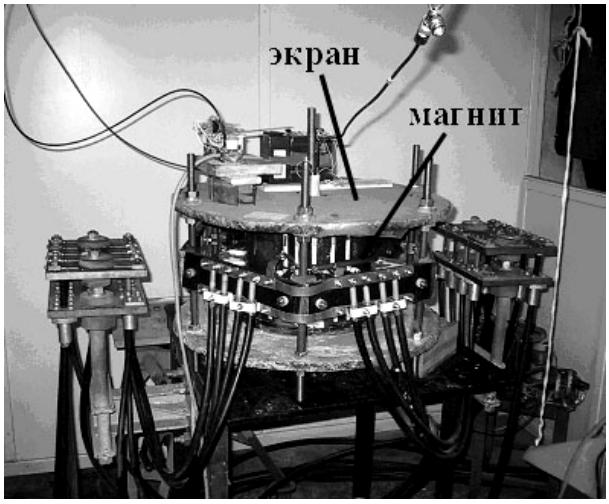

Рис.14 Квазибессиловая магнитная система на испытательном стенде.

В этой зоне поле близко к бессиловому, и токовые слои должны быть уравновешены. В области $b_k c_k$ протекания обратного аксиального тока индукция имеет лишь азимутальную компоненту, токовые слои обмотки не уравновешены и действующие на них силы воспринимаются диэлектрическими цилиндрами DC_1, DC_2, DC_3. Каркас - Т служит для удобства размещения на нем витков третьего слоя. Выбор геометрии системы, угла наклонов и величин токов, чисел витков в слоях происходил в соответствии с изложенными выше принципами. Реальный магнит выполнен из круглых медных изолированных проводов диаметром 2.5 мм с толщиной изоляции 0.25 мм. Конфигурации проводов представлены на рис.11.

Разработанный алгоритм расчета электромагнитного поля и моделирования механических напряжений методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS в приближении осевой симметрии магнитной системы позволил получить распределение напряжений по сечению магнита, см. рис.12. При реализации алгоритма были созданы дополнительные процедуры по расчету объемных сил от полоидальных токов и согласованию данных магнитного и механического анализа, которые отсутствовали в основном пакете программы. Механические расчеты выполнялись в лаборатории вычислительной механики СПбГПУ. Рассчитанные напряжения подтвердили работоспособность методик выбора токораспределения в средней и торцевой зонах магнита и возможность снижения механических напряжений в магните до величины порядка $B_0^2/(2\mu_0 N^2)$.

Фотографии магнита показаны на рис.13,14. На данный момент проведена серия электрических измерений и идет подготовка к механическим измерениям. Результаты расчетных и измеренных (указаны в скобках) индуктивностей представлены в таблице 3 и показывают различия, близкие к погрешности измерений. Полная индуктивность системы составила L=9.8 мкГн. Число витков (w_1=11, w_2=11, w_3=11) и количество параллельных проводов (n_1=4, n_2=4, n_3=2) рассчитаны так, чтобы при использовании источника с заданными параметрами (C=16 мФ, U=6.6 кВ) нагрев проводников за время разряда не превышал 165^0C, что имеет место, если поле в центре соленоида составляет 20 Тл, а длительность полупериода – 1.24 мс. Измерения магнитного поля под экраном (путь AA’- рис.10) показали, что модель в условиях аксиальной симметрии позволяет достаточно точно описать поле в приосевой зоне, но дает погрешность 20-30% на периферии системы. Такое отличие показывает необходимость усовершенствования расчетной модели. При ее дальнейшем развитии требуется более корректный учет дискретности проводников в периферийной зоне.

В целом, численные расчеты, созданная модель и проведенные на ней измерения подтверждают работоспособность разработанных методик и реальность создания подобных систем для генерации сверхсильных магнитных полей.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Показано, что применение в наиболее нагруженных частях обмотки специального токораспределения, близкого к бессиловому, («квазибессилового») обеспечивает резкое снижение механических напряжений. Приближение к бессиловому токораспределению достигается за счет наличия в обмотке полоидальных токов. Преимуществом предложенной системы является теоретическая возможность получения требуемых значений индукции при линейном росте радиальных размеров, в то время как в известных на сегодняшний день конструкциях такой рост является экспоненциальным. Это дает принципиальную возможность генерации значительно больших величин магнитного поля, чем достигнутые в современных конструкциях.

2. Выявлен наиболее эффективный вариант минимизации напряжений, возникающих под действием электромагнитных сил, – реализация слоев обмотки токами переменного направления, и выполнены оценки влияния отклонения угла намотки от расчетных значений. Напряжения при такой реализации составляют величину $B_0^2/(2\mu_0 N^2)$, где B_0 – индукция рабочего поля, N – число слоев.

3. Разработана методика выбора радиусов слоев в зоне обратного тока, обеспечивающих возникновение равных допустимых напряжений в удерживающих бандажах и минимизацию радиальных размеров системы.

4. На примере соленоида с трехслойной квазибессиловой обмоткой с токами переменного направления показано, что при создании поля с индукцией 100 Тл в средней части соленоида можно обеспечить механические напряжения на уровне допустимых напряжений обычных конструкционных материалов (порядка 400 МПа) по всему сечению, включая как зону квазибессиловой обмотки, так и зону обратного тока.

5. Тепловой расчет с учетом скин-эффекта показал, что даже при оптимальном режиме требуемое число слоев выше, чем необходимо по соображениям прочности. Это заставляет использовать транспонированные проводники.

6. Показан способ выбора конфигурации и токораспределения в слоях, обеспечивающий равновесие квазибессиловой обмотки системы не только в средней зоне, но и в торцевой части магнита. Приведен пример, который показывает техническую возможность реализации трехслойного магнита с полем 100 Тл в системе с плоским торцевым экраном без превышения прочностных пределов конструкционных материалов.

7. Разработана методика согласования магнитной системы и емкостного источника энергии. Составлена эквивалентная схема соленоида, разработана методика выбора числа витков и дополнительных индуктивностей.

8. Разработан и реализован алгоритм моделирования распределения магнитного поля и механических напряжений методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS в приближении осевой симметрии магнитной системы. Численные расчеты подтверждают возможность резкого снижения механических усилий в магнитной системе, где слои обмотки с азимутальным током уравновешены благодаря наличию аксиальной компоненты тока.

9. Создана первая натурная модель квазибессилового магнита. Модель позволяет путем сравнения результатов компьютерных расчетов и экспериментов подтвердить выдвинутую концепцию квазибессилового магнита. Одновременно при ее создании были решены вопросы технологии изготовления обмоток, имеющих сложную пространственную конфигурацию.

10. Созданная модель и проведенные на ней измерения подтверждают реальность создания подобных систем и работоспособность представленных методик по выбору основных параметров системы, расчету числа витков и согласованию ее с источником энергии.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Шнеерсон Г.А., Колтунов О.С., Хозиков В.Ю. Минимизация остаточных напряжений в магнитных системах с квазибессиловым распределением тока // ЖТФ, 2002, т.72, №1. – С.110-116.
2. Колтунов О.С. Исследование квазибессиловых систем применительно к созданию неразрушающихся соленоидов сверхсильного поля // Восьмая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотация работ по грантам Санкт-Петербургского конкурса 2003 года для студентов, аспирантов и молодых специалистов. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. – С.76.
3. Computer modeling of components of a quasi-force-free magnet with variable directed currents / Shneerson G.A., Borovkov A.I., Koltunov O.S. et al. // Ninth International Conference on Magnetic Field Generation and Related Topics. – Sarov: VNIIEF, 2004. – P.602-615.
4. The Concept of Quasi-force-free Magnets: Theoretical Substantiation, Estimation of Parameters, and Feasibility / Shneerson G.A., Koltunov O.S., Schneider-Muntau H.J. et al. // Proceedings of The Seven International Symposium on Research in High Magnetic Fields. – Phisica B, 2004, vol. 346-347. – P.566-570.
5. Получение сверхсильных магнитных полей в неразрушаемых квазибессиловых магнитах / Шнеерсон Г.А., Колтунов О.С., Schneider-Muntau H.J. и др. // Труды Международного Семинара “Гидродинамика высоких плотностей энергии”. – Новосибирск: Изд-во института Гидродинамики СО РАН, 2004. – С.70-75.

Работа выполнена в государственном общеобразовательном учреждении
высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Шнеерсон Герман Абрамович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
Кучинский Владимир Георгиевич

кандидат технических наук,
доцент
Карпова Ирина Михайловна

Ведущая организация: Институт электроэнергетики и электрофизики РАН
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится "____" февраля 2005 г. в 14 часов в аудитории 325 главного здания на заседании диссертационного совета К 212.229.03 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

С диссертацией можно ознакомится в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электромеханический факультет. Диссертационный совет К 212.229.03

Автореферат разослан "____" января 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н., доцент Гумерова Н.И.