

УДК 621.318.3

И.А. Вечеров, А.П. Ненашев, А.А. Парфентьев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ДЕФОРМАЦИИ ОДНОСЛОЙНОГО КВАЗИБЕССИЛОВОГО МАГНИТА

I.A. Vecherov, A.P. Nenashev, A.A. Parfentiev

EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL CALCULATIONS OF DEFORMATION OF THE SINGLE-LAYER QUASI-FORCE-FREE MAGNET

В статье рассмотрены результаты компьютерного моделирования методом конечных элементов однослойного квазибессилового магнита с обмоткой конечной толщины. Ранее расчеты были выполнены в приближении бесконечно малой толщины слоев и непрерывного токораспределения. Необходимое условие равновесия квазибессилового магнита — баланс полных сил растяжения и сжатия в радиальном направлении, возникающих вследствие действия на обмотку полоидальной и азимутальной компонент магнитного поля. У магнита с обмоткой конечной толщины наблюдается отклонение от равновесного состояния. Нарушение условия равновесия компенсируется путем введения дополнительного аксиального поля. В ходе эксперимента было показано влияние дополнительного поля на деформации магнита.

КВАЗИБЕССИЛОВАЯ МАГНИТНАЯ СИСТЕМА; СИЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ; ДЕФОРМАЦИИ; ИНТЕРФЕРОМЕТР; БАЛАНС СИЛ.

The article considers the results of computer simulation by the method of finite elements for a single-layer quasi-force-free magnet winding of finite thickness. Earlier calculations were made in the approximation of infinitesimal thickness of layers and continuous current distribution. A necessary condition for equilibrium quasi-force-free magnet is the balance of the full forces of expansion and contraction in the radial direction, arising out of actions on a winding represents the dependences on toroidal and azimuthal components of a magnetic field. For the magnet winding of finite thickness is marked deviation from the equilibrium state. Violation of the conditions of equilibrium is compensated by injection an additional axial field. The experiment made shows the effect of the additional fields on deformations of a magnet.

QUASI-FORCE-FREE MAGNET; STRONG MAGNETIC FIELD; DEFORMATIONS; INTERFEROMETER; BALANCE OF FORCES.

Магнитные поля применяются во многих областях науки как удобный, универсальный инструмент исследований. С помощью магнитного поля легко воздействовать на исследуемый объект, при этом не разрушая его. В мире существуют несколько крупных лабораторий, обладающих мощными установками по созданию сильных магнитных полей, которые привлекаются для научных исследований в различных областях — от изучения свойств твердого тела, изучения поведения живых организмов до работ в области термоядерного синтеза.

Сама по себе проблема создания сильного магнитного поля (от 10 до 100 Тл) — комплексная,

требующая решения трех основных задач: создания источника энергии достаточной мощности; преодоления перегрева и термического разрушения магнита; снижения либо преодоления механических напряжений, приводящих к разрушению магнита. Если первые две задачи, достаточно тесно связанные между собой, уже имеют ряд решений, то проблема механических напряжений стоит достаточно остро, поскольку применяемые материалы не способны выдержать механические напряжения, возникающие под действием пндомоторных сил, что приводит к разрушению катушки, а иногда и исследуемого образца. Одно из важнейших требований к лю-

бому эксперименту — повторяемость условий его проведения. Между тем это сложно обеспечить в случае, если катушка разрушается в ходе опыта. Из сказанного следует, что, наряду с достижением сильного поля, остро стоит вопрос о не разрушаемости самой магнитной системы. В связи с этим большой интерес представляют неразрушаемые квазибессилловые магниты. В их катушках распределение тока в обмотке организовано так, чтобы уравновесить силы, действующие на обмотку, и тем самым снизить механические напряжения, возникающие в ней.

Конструктивно такой магнит представляет собой тороидальную обмотку, уложенную на основание из диэлектрика. Угол наклона проводника и профиль образующей, по которой он укладывается, рассчитываются исходя из условия снижения механических напряжений. На внешнем радиусе обмотка удерживается экраном либо диэлектрическим бандажом.

В работах [1–4] были рассмотрены как простейшая однослойная модель, так и многослойная квазибессилловая обмотка с токами, изменяющими свое направление в каждом слое. Аналитические расчеты различных конфигураций аксиально-симметричных квазибессилловых систем, приведенные ранее [5], показали резкое снижение механических напряжений в обмотке. Расчеты были выполнены в предположении бесконечно малой толщины слоев и непрерывного токораспределения в азимутальном направлении. На практике обмотка имеет конечную толщину и дискретное токораспределение, что может приводить к появлению механических напряжений и деформациям обмотки выше расчетных

В данной работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований однослойного магнита с обмотками конечной толщины и численных расчетов, выполненных методом конечных элементов. Отмечено отклонение от равновесного состояния у магнита конечной толщины. Аналитически и численным расчетом показана возможность коррекции сил, действующих в обмотке, путем введения дополнительного аксиального поля. В ходе эксперимента было показано влияние дополнительного поля на деформации магнита, а также рассмотрена возможность дополнительной коррекции магнитной системы с целью достижения минимальных деформаций обмотки.

Квазибессилловая магнитная система. Условия равновесия обмоток

Конфигурации различных аксиально-симметричных квазибессилловых систем описаны в работе [6]. Эти системы состоят из двух областей: внутренней — рабочей; внешней — зоны токоотвода. Во внутренней области магнита находится квазибессилловая обмотка, в общем случае состоящая из N токовых слоев. Индукция магнитного поля в этой обмотке имеет полоидальную составляющую B_p и азимутальную составляющую поля B_ϕ , при этом линейная плотность тока в слоях выбирается такой, что все слои находятся в состоянии равновесия. На внешней области магнита поле нельзя считать бессилловым, так как индукция поля в этой области может иметь как азимутальную, так и полоидальную составляющую. Последняя при этом весьма мала, если азимутальный ток в этой области отсутствует. Радиальные механические усилия, возникающие здесь вследствие неравновесия обмотки, воспринимаются внешним диэлектрическим бандажом. Исходная конфигурация в приближении бесконечно малой толщины слоя и расчетная модель с обмоткой реальной толщины показаны на рис. 1 (ось Z — ось аксиальной симметрии).

Необходимое условие равновесия квазибессиллового магнита — баланс полных сил растяжения и сжатия в радиальном направлении, возникающих вследствие действия на обмотку полоидальной и азимутальной компонент магнитного поля. Равнодействующая этих сил определяет механические напряжения, возникающие в обмотке [4, 6]. Радиальная компонента полной силы равна

$$F_r = \frac{B_i^2 - B_e^2}{2\mu_0}, \quad (1)$$

где B_i , B_e — индукции с внутренней и внешней стороны токового слоя.

В уравновешенной обмотке малой толщины сила $F_r = 0$. В этом случае выполняется известное условие равновесия, когда модули индукций B_p и B_ϕ равны. Деформации системы с уравновешенной радиальной компонентой силы будут минимальны [4]. При этом можно ожидать, что система с минимальным смещением границы соответствует системе с минимальными эффективными напряжениями.

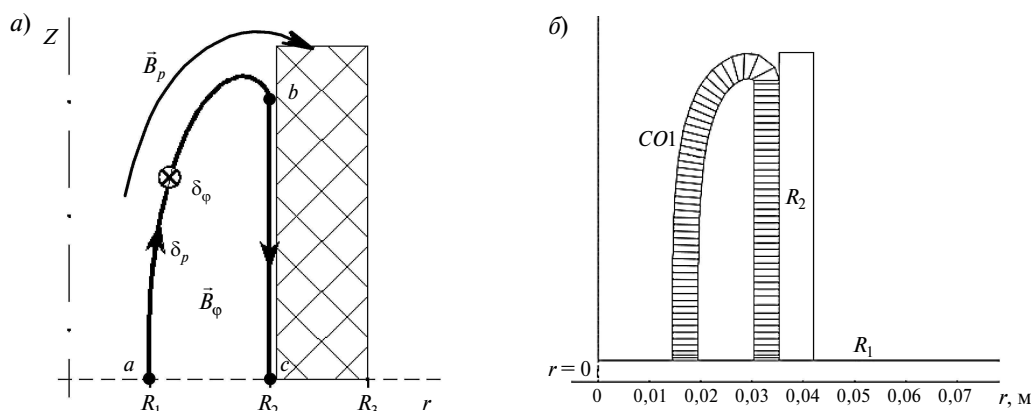


Рис. 1. Исходные конфигурации квазибесселевой обмотки:

a — обмотка в приближении бесконечно малой толщины; *b* — расчетная модель обмотки в программе COMSOL

В реальном магните условие $F_r = 0$ может быть нарушено. Причиной отличия радиальной силы от нуля могут быть дефекты конструктивного выполнения обмотки. На равновесие обмотки влияет также дискретность проводников, так как расчетное распределение плотности тока непрерывно, а не дискретно.

Силы, воздействующие на обмотку, можно изменить, включив дополнительное азимутальное поле. Оно создается аксиальным током, который проходит по оси магнита. Проводник с аксиальным током подключен параллельно магниту, поэтому дополнительное поле изменится во времени так же, как основное. Регулируя величину дополнительного поля, можно компенсировать небаланс радиальной силы, возникший вследствие технологических дефектов. Таким образом можно производить настройку магнита на минимальную деформацию, а значит, и на минимальные механические напряжения.

В формуле (1) дополнительное поле учтено следующим образом.

Азимутальная компонента индукции с внутренней стороны обмотки есть

$$B_{i\varphi} = \mu_0 i_2 / (2\pi R), \quad (2)$$

а с внешней стороны —

$$B_{e\varphi} = \mu_0 (i_1 + i_2) / [2\pi(R + d)] = B_{1\varphi} + B_{2\varphi}, \quad (3)$$

где i_1 — полоидальный ток в обмотке. Соответственно

$$B_{1\varphi} = \mu_0 i_1 / [2\pi(R + d)];$$

$$B_{2\varphi} = \mu_0 i_2 / [2\pi(R + d)].$$

Индукция полоидального поля с внутренней стороны равна своему расчетному значению

$$B_{i\rho} = B_0, \quad (4)$$

а снаружи равна нулю.

При наличии продольного тока выражение для радиальной силы принимает вид

$$2\mu_0 F_r = (B_0^2 + B_{2\varphi}^2) - B_{e\varphi}^2. \quad (5)$$

В случае обмотки малой толщины $B_{2\varphi} = B_{i\varphi}$. В этом приближении имеем следующее выражение для радиальной силы:

$$2\mu_0 F_r = B_0^2 - B_{1\varphi}^2 - 2B_{2\varphi} B_{1\varphi}. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что в зависимости от знака индукции дополнительного поля $B_{i\varphi}$, т. е. в зависимости от знака полоидального тока i_2 , сила F_r может изменить свой знак и принять нулевое значение. В уравновешенной обмотке малой толщины сила $F_r = 0$ без включения дополнительного поля, т. е. при условии $B_{i\varphi} = 0$. В этом случае выполняется известное условие равновесия, когда модули индукций B_0 и $B_{1\varphi}$ равны.

Компьютерное моделирование деформации обмотки квазибесселевого магнита

Для компьютерного моделирования квазибесселевой обмотки методом конечных элементов использована программа COMSOL Multiphysics. При выборе геометрии в качестве исходной принята конфигурация однослойного магнита с внешним бандажом (рис. 1). Она была рассчитана путем решения краевой задачи в приближении бесконечно малой толщины обмотки.

В ходе расчета осуществлен переход к обмотке конечной толщины. Толщины витков и бандажа выбраны такими же, как у экспериментальной магнитной системы.

Основной целью расчета была проверка возможности настройки системы на минимум смещения ее границ. В ходе моделирования в программе решались три задачи. Первые две задачи — это моделирование полей, создаваемых азимутальными и полоидальными токами в обмотке.

Данные, полученные при моделировании магнитных полей, использовались при решении механической задачи. Силы, действующие в обмотке, были заданы следующей системой уравнений:

$$F_r = B_{z p_1} J_{\varphi_1} - B_{z \varphi_2} J_{p_2}; \quad (8)$$

$$F_z = B_{r \varphi_2} J_{p_2} - B_{r p_1} J_{\varphi_1}, \quad (9)$$

где F_r — радиальная составляющая силы; F_z — осевая составляющая силы; $B_{z p_1}$, $B_{r p_1}$ — осевая и радиальная составляющие магнитной индукции полоидального поля, полученные при решении первой задачи; $B_{z \varphi_2}$, $B_{r \varphi_2}$ — осевая и радиальная составляющие магнитной индукции азимутального поля, полученные при решении

второй задачи; J_{φ_1} — линейная плотность азимутального тока, задаваемая в первой задаче; J_{p_2} — линейная плотность полоидального тока, задаваемая во второй задаче.

Используя приведенные выше уравнения, в модели были получены распределения механических напряжений по Мизесу и смоделированы перемещения обмотки под действием ponderomotorных сил. На рис. 2 показаны графики распределения радиальной составляющей силы в средней части ($Z = 0$) обмотки (см. рис. 1). Графики приведены для случая равновесия обмотки ($K = 0$) и нарушения условия равновесия дополнительным током ($K = 0,01 \text{ In}$), жирными линиями показаны границы обмотки на внутреннем и внешнем радиусе.

Для моделирования действия дополнительного аксиального тока в исходную систему уравнений, описывающую силы, была введена дополнительная составляющая. При этом величина тока на оси для настройки магнита регулировалась путем выбора коэффициента K , равного отношению добавочного тока к току, протекающему в самой обмотке. Знак дополнительной составляющей в уравнении показывает, каково направление корректирующего тока относительно основного:

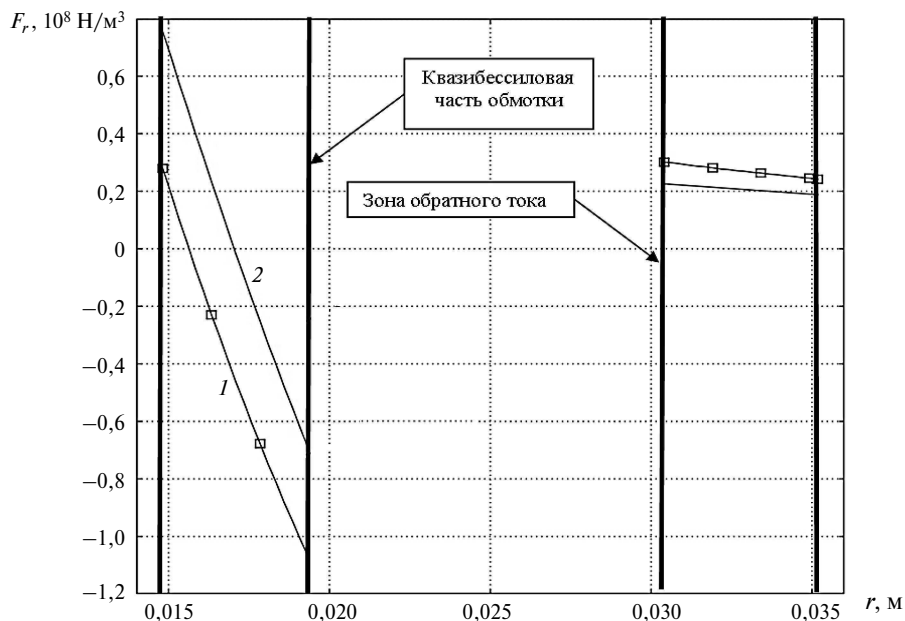


Рис. 2. Распределение радиальной составляющей силы, действующей в обмотке с дополнительным током (1) и без дополнительного тока:

—■— при $K = 0,01 I_n$; — — — $K = 0$

$$F_r = B_{z\rho_1} J_{\varphi_1} - B_{z\rho_2} J_{\rho_2} \pm \left(\frac{B_{z\varphi_2} (J_{\rho_2} K)}{r} \right) \quad (10)$$

$$F_z = B_{r\varphi_2} J_{\rho_2} \pm \left(\frac{B_{r\varphi_2} (J_{\rho_2} K)}{r} \right) - B_{r\rho_1} J_{\varphi_1}. \quad (11)$$

Ниже приведены графики перемещения обмотки и действующих в ней механических напряжений в зависимости от величины и направления корректирующего тока на оси магнита (рис. 3). Значение корректирующего тока на графике отложено в относительных единицах по оси абсцисс, а по двум осям ординат отложены механические напряжение σ в Па и перемещение обмотки Δr , мкм.

Из графиков видно, что нулевые перемещения обмотки соответствуют минимальным механическим напряжениям, возникающим в ней. Данные рис. 3 показывают, что при нулевом дополнительном токе напряжения в обмотке близки к минимальным и смещение границы мало. Это свидетельствует о том, что равновесие обмотки практически не было нарушено при переходе от исходной модели с обмотками нулевой толщины к реальной магнитной системе с обмоткой конечной толщины. Результаты расчета показывают, что даже небольшой дополнительный ток может заметно изменить напряжения и деформацию обмотки. Следовательно, с помощью такого тока можно производить коррекцию магнитной системы: компенсировать силы, возникающие из-за технологических дефектов обмотки, и осуществлять режим с нулевым пере-

мещением границы и минимальным напряжением.

Необходимо отметить, что численное моделирование проводилось в статическом режиме, т. е. в модели не учитывались возможные динамические эффекты.

Экспериментальные исследования деформации однослойного квазибессилового магнита с дополнительным азимутальным полем

Для исследования деформации квазибессилового обмотки разработан трехзаходный магнит. Методом быстрого прототипирования изготовлена модель и по ней отлит алюминиевый образец.

Измерения малых перемещений обмотки производились с помощью интерферометра Майкельсона, выполненного на основе He-Ne лазера с длиной волны 632 нм. На внутренней поверхности витка соленоида наклеено зеркало, а в бандеже напротив зеркала имеется отверстие для ввода лазерного луча. Комбинированная принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

Для сравнения измеренных деформаций с рассчитанными целесообразно использовать относительно слабое магнитное поле, в котором смещение поверхности проводника составляет несколько микрон, что соответствует оптимальным условиям для лазерного интерферометра, работающего в красной области спектра. Неразрушающие испытания в слабом поле позволяют,

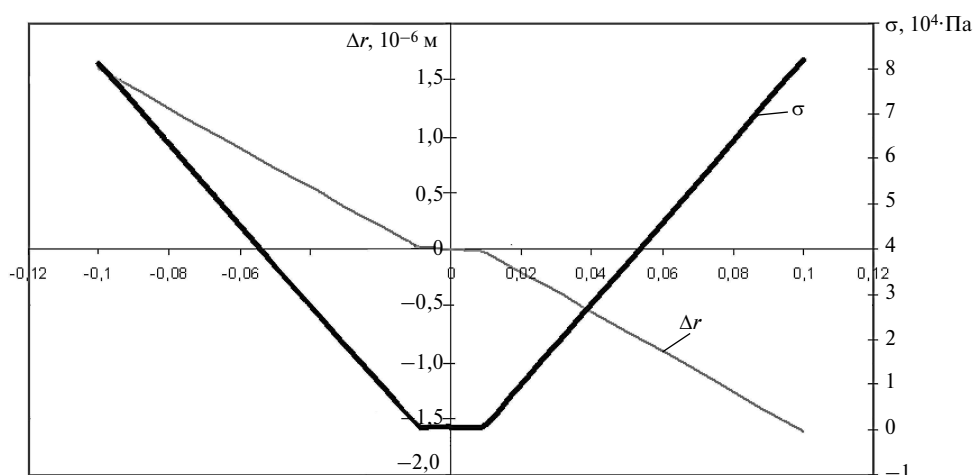


Рис. 3. Зависимость перемещения и механических напряжений в обмотке, имеющей поле с индукцией 1 Т, от корректирующего тока на оси магнита

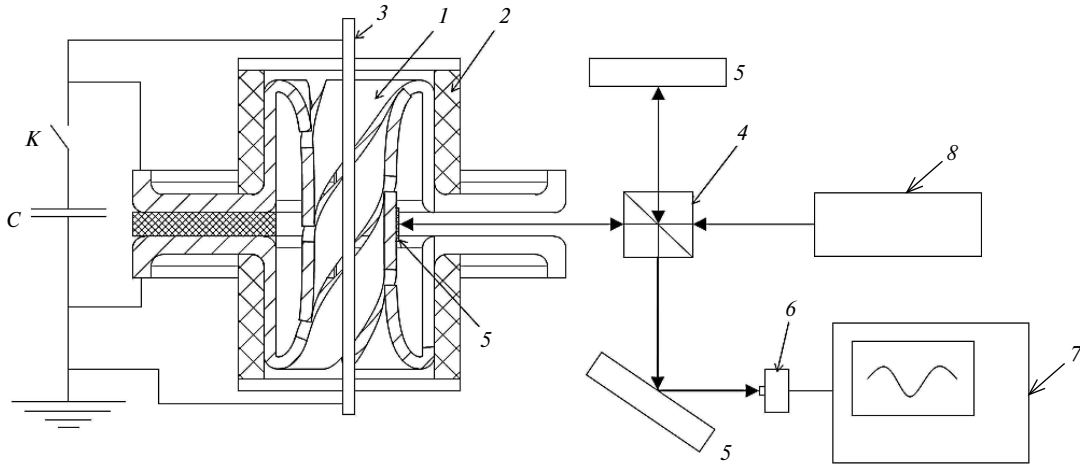


Рис. 4. Комбинированная схема экспериментальной установки:

1 — обмотка; 2 — диэлектрический бандаж; 3 — стержень с дополнительным током; 4 — делитель; 5 — зеркало; 6 — светоприемник с усилителем; 7 — осциллограф; 8 — источник лазерного излучения; C — батарея конденсаторов; K — разрядник

в частности, зафиксировать деформации, обусловленные несовершенством магнитной системы, например ее отклонением от расчетной аксиально-симметричной конфигурации.

Смещение внешней границы квазибеспиловой обмотки может быть рассчитано по изменению фазы сигнала, записанного датчиком интенсивности оптического излучения. Изменение фазы сигнала на угол 2π соответствует абсолютному значению смещения границы обмотки на расстояние, равное длине волны излучения гелий-неонового лазера (632 нм). Знак смещения не может быть определен используемым методом. На рис. 5 показана интерферограмма, а на рис. 6 — смещение внутренней границы витка.

Из этих рисунков видно, что максимум смещения, достигаемый в момент максимума тока, составляет около 0,2 мкм. Как видно из интерферограмм, максимальные перемещения за максимумом тока обусловлены вибрацией обмотки.

После проверки равновесия системы на оси катушки был установлен проводник для создания дополнительного азимутального поля и изменения режима нагружения магнита. На рис. 7 представлены результаты экспериментов при двух значениях продольного тока — $I_z = 0,14I_0$ (он здесь совпадает по знаку с током в обмотке) и $I_z = -0,14I_0$ (в этом случае он направлен навстречу току обмотки), а так же в отсутствие дополнительного тока на оси магнита ($I_z = 0$).

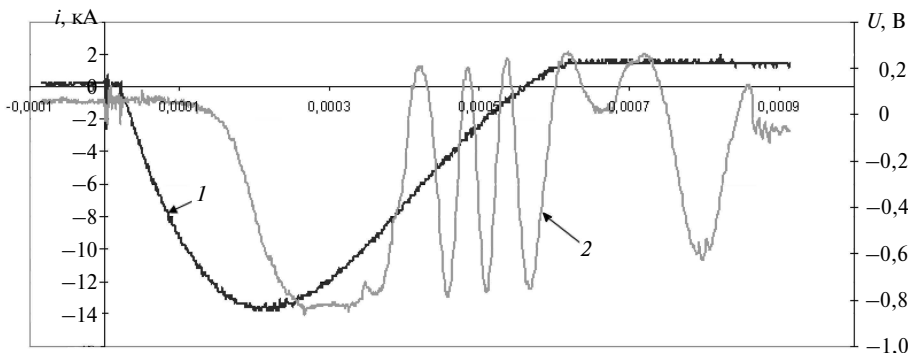


Рис. 5. Интерферограмма, характеризующая смещение обмотки соленоида:

1 — ток соленоида; 2 — изменение фазы сигнала, фиксируемое датчиком

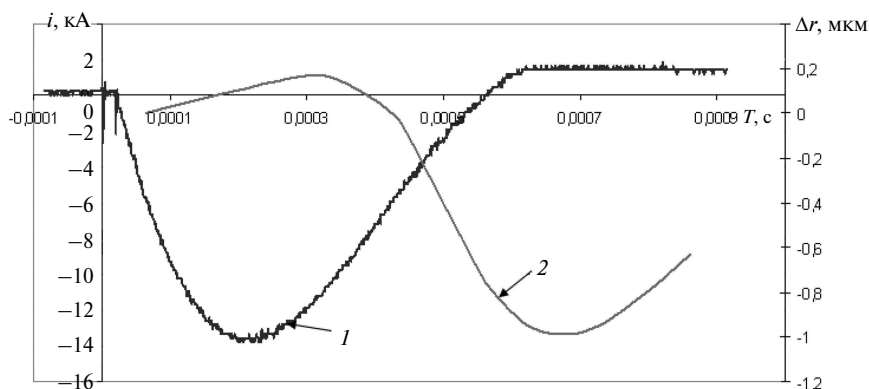


Рис. 6. Смещение обмотки соленоида (результаты обработки интерферограммы):
 1 — ток в обмотке; 2 — абсолютное значение смещения

При включении дополнительного тока согласно току в обмотке возрастает сила сжатия, действующая на обмотку. Поэтому следует ожидать, что модуль смещения будет возрастать по сравнению со смещением в исходном состоянии, если в этом состоянии смещение было отрицательным, и убывать в противоположном случае. Результаты опытов с дополнительным током показывают, что абсолютное значение смещения возрастает при согласном включении тока I_z . Отсюда следует, что начальное смещение обмотки при разряде без дополнительного тока было отрицательным. При включении дополнительного тока встречно току обмотки сжатие обмотки азимутальным полем ослабевает. Это дает основание считать, что смещение границы будет происходить в положительном направле-

нии (наружу). В эксперименте с током $I_z = +0,14I_0$ смещение по абсолютному значению близко к исходному. При этом (на основании сказанного) можно считать, что его знак изменился и стал положительным. Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность «управлять» знаком деформации с помощью относительно небольшого продольного тока и при необходимости корректировать силы, возникающие в обмотке.

Расчет методом конечных элементов показал некоторое отклонение квазибесилового магнита от условия равновесия при переходе от бесконечно тонкого слоя к обмотке реальной толщины: отмечено нарушение равновесия в обмотке. Расчетом показано, что нарушение

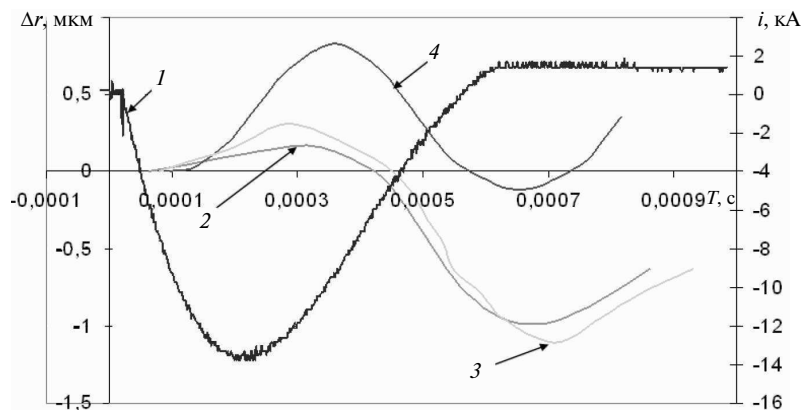


Рис. 7. Зависимость смещения обмотки соленоида от режима нагружения (I — ток магнита; перемещение при дополнительных токах: 2 — $I_z = 0$; 3 — $I_z = -0,14I_0$; 4 — $I_z = 0,14I_0$)



баланса может быть скорректировано дополнительным искусственно введенным азимутальным полем.

В ходе эксперимента на реальном образце наблюдалось смещение обмотки, что говорит о нарушении условия равновесия вследствие технологических причин. На опытном образце

была подтверждена возможность коррекции магнитного поля катушки с помощью дополнительного азимутального поля. В дальнейшем эта методика может быть применена для получения сильных и сверхсильных полей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13–08–00899

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнеерсон, Г.А. Длинные соленоиды с бессиловой обмоткой без внешних разгружающих проводников // Журнал технической физики. 1986 Т. 56, №1. С. 36–43.
2. Amromin E.L., Khosikov V.Yu., Shneerson G.A. Solenoid for Megagauss Magnetic Fields: non-collapsing Windings design Problems // *Plasma Devices and Operations*. 1998. Vol. 4. P. 321–326.
3. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. The Concept of Quasi-force-free Magnets: Theoretical Substantiation, Estimation of Parameters, and Feasibility // *Physica B*, 2004. Vol. 346–347. P. 566–570.

4. Колтунов О.С., Хозиков В.Ю., Шнеерсон Г.А. Минимизация остаточных напряжений в магнитных системах с квазибессильным распределением тока // Журнал технической физики. 2002. Т. 72, №1. С. 110–116.
5. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. Models of magnets with quasi-force-free Winding Manufactured from the thin solid sheets or transposed conductors. *IEEE transactions of plasma science*. 2010. Vol. 38. № 8. P. 1731–1737.
6. Шнеерсон Г.А., Вечеров И.А., Дегтев Д.А. [и др.]. Конфигурации коаксиально-симметричных квазибессильных магнитных систем II // ЖТФ. 2008. Т.78, №10. С. 29–39.

REFERENCES

1. Shneerson G.A. Long solenoids with force-free winding without external unloading guides. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1986. Vol 56, №1. P. 36–43. (rus.)
2. Amromin E.L., Khosikov V.Yu., Shneerson G.A. Solenoid for Megagauss Magnetic Fields: non-collapsing Windings design Problems. *Plasma Devices and Operations*. 1998. Vol. 4. P. 321–326.
3. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. The Concept of Quasi-force-free Magnets: Theoretical Substantiation, Estimation of Parameters, and Feasibility. *Physica B*. 2004. Vol. 346–347. P. 566–570.

4. Koltunov O.S., Shneerson G.A., Khozikov V.Yu. Minimization of residual stresses in magnetic systems with quasi-force-free current distribution. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2002. Vol. 72, №1. P. 110–116. (rus.)
5. Shneerson G.A., Koltunov O.S. [et al.]. Models of magnets with quasi-force-free Winding Manufactured from the thin solid sheets or transposed conductors. *IEEE transactions of plasma science*. 2010. Vol. 38. № 8. P. 1731–1737.
6. Shneerson G.A., Vechev I.A., Degtev D.A. [et al.]. Configuration coaxial-symmetric quasi-force-free magnetic systems II. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2008. Vol. 78, №10. P. 29–39. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕНАШЕВ Алексей Павлович — кандидат технических наук доцент кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Телефон: 8(812)555-42-86

ПАРФЕНТЬЕВ Анатолий Алексеевич — старший научный сотрудник кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, СПбГПУ; 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 Россия; e-mail: an.parf@gmail.com

ВЕЧЕРОВ Иван Альбертович — аспирант кафедры техники высоких напряжений, изоляционной и кабельной техники института энергетики и транспортных систем Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, СПбГПУ, Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29 Россия; e-mail: preacher@yandex.ru

AUTHORS

NENASHEV Aleksey P. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia

PARFENTIEV Anatoliy A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: an.parf@gmail.com

VECHEROV Ivan A. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia. E-mail: preacher@yandex.ru