

PACS: 07.55.Db, 76.30.-v, 84.32.Hh, 84.71.Ba, 84.71.Mn

Д.В. Варюхин, Н.В. Таряник, Е.А. Дворников, Д.О. Федюк

## СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ СОЛЕНОИДЫ ДЛЯ РАДИОСПЕКТРОМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 года

*Приведены результаты разработки трех сверхпроводниковых соленоидов, предназначенных для исследований свойств материалов методом электронного парамагнитного резонанса 2-миллиметрового диапазона. Соленоиды создают в центральной зоне магнитное поле с индукцией до 7.5 Т. Для настройки высокой однородности магнитного поля используются сверхпроводниковые обмотки компенсации осевых и радиальных градиентов поля соленоидов. Исследовано несколько конструкций обмоток развертки и модуляции магнитного поля, выбрана оптимальная конструкция, обеспечивающая эффективный ввод в соленоид поля развертки и модуляции. Измерена стабильность магнитного поля в короткозамкнутом режиме соленоида в зависимости от технологии изготовления соединительных контактов сверхпроводников.*

**Ключевые слова:** сверхпроводниковый соленоид, обмотка развертки и модуляции магнитного поля, однородность поля, индуктивность и взаимная индуктивность, магнитная постоянная, эффективность ввода поля развертки и модуляции, обмотки коррекции, градиент магнитного поля, стабильность поля

С целью получения сильных магнитных полей с индукцией до 10 Т высокой однородности в объеме и стабильности во времени для спектроскопии электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонанса широко используются сверхпроводниковые соленоиды [1,2]. Методика расчета однородных соленоидов описана в [3]. В настоящей работе приводятся результаты разработки и исследований трех конструкций сверхпроводниковых соленоидов для радиоспектрометра электронного парамагнитного резонанса.

К сверхпроводниковым соленоидам с высокой однородностью магнитного поля предъявляется ряд требований:

1. При изготовлении обмотки необходимо строго выдерживать расчетные размеры, в особенности корректирующих элементов – внутреннего и наружного пазов.
2. Если соленоид состоит из нескольких секций, то не допускается их смещение как вдоль оси, так и по радиусу обмотки. При изготовлении обмоток требуется избегать их овальности.

3. Необходимо обеспечивать высокую эффективность ввода в рабочую область соленоида внешних магнитных полей – полей развертки, модуляции, коррекции однородности поля.

В работе [4] исследовано влияние неточностей при изготовлении корректирующих пазов на однородность поля в центре соленоида. Так, неточность размеров наружного паза в полдиаметра сверхпроводника приводит к ухудшению однородности поля на уровне  $10^{-5}$  Ое/см, а внутреннего паза – на уровне  $10^{-4}$  Ое/см.

Несоосность секций и овальность обмотки вызывают ухудшение однородности поля за счет появления в его распределении радиальных градиентов  $dH/dx$  и  $dH/dy$ , а пересечение осей секций – к появлению смешанных градиентов  $d^2H/dzdx$  и  $d^2H/dzdy$ . Смещение секций вдоль оси и непостоянная плотность витков по длине обмотки приводят к появлению осевого градиента поля  $dH/dz$ .

### 1. Сверхпроводниковый соленоид № 1

Конструктивно соленоид состоит из двух силовых секций для создания сильного магнитного поля и обмотки развертки (модуляции) поля. Для повышения однородности поля во внутренней секции выполнен внутренний корректирующий паз, а во внешней – наружный паз. Размеры соленоида приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры соленоида № 1

№ секции	Размеры секции, mm			Корректирующий элемент	Размеры паза, mm		
	диаметр		длина		диаметр		длина
	внутренний	наружный			внутренний	наружный	
1	43.0	84.0	190.0	Внутренний паз	43.0	46.0	45.0
2	88.0	142.0		Наружный паз	136.0	142.0	100.0

Обмотки секций соленоида намотаны сверхпроводниковым проводом сплава НТ-50 диаметром 0.5 mm на каркас из сплава Д16Т. Внутренняя секция намотана проводом с коэффициентом заполнения 50% и содержит 32 слоя, при этом высота внутреннего паза равна высоте трех слоев обмотки. Общее число витков в секции 10475. Наружная секция намотана проводом с коэффициентом заполнения 30% и содержит 50 слоев. Высота наружного паза соответствует высоте шести слоев обмотки. Число витков в секции 13912. У однородных соленоидов наблюдается влияние намагниченности обмотки на характер распределения поля и магнитную постоянную [5]. В

диапазоне магнитных полей 1–7 Т для однородных соленоидов 6-го порядка, скорректированных внутренним пазом [6], вклад в неоднородность поля намагниченности обмотки вдоль оси  $z$  на длине  $z/a_1 = \pm 0.5$  (где  $a_1$  – внутренний радиус обмотки) по порядку величины изменяется от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  Ое, а для соленоидов, скорректированных наружным пазом, – от  $10^{-4}$  до  $10^{-5}$  Ое. При этом у соленоидов с наружным пазом при увеличении и уменьшении поля однородность изменяется противоположно по отношению к соленоидам с внутренним пазом, и таким образом возникает возможность компенсации влияния поля намагниченности на однородность за счет совместного применения обоих пазов.

Магнитные характеристики соленоида измеряли автодинным ЯМР-тесламетром [9]. Постоянная соленоида составила 0.155 Т/А, максимальное значение индукции магнитного поля 7.5 Т. Однородность магнитного поля в центральной зоне была измерена в диапазоне 1.5–7 Т как при увеличении, так и при уменьшении поля. При этом изменение однородности в указанном диапазоне полей не превышало  $3 \cdot 10^{-5}$  Ое (рис. 1). Изменение магнитной постоянной соленоида в том же диапазоне полей менее 0.1%.

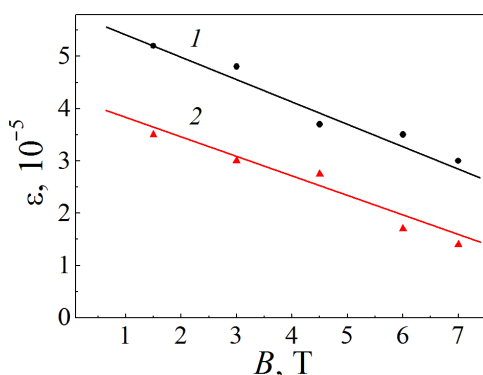


Рис. 1. Зависимость однородности от величины индукции магнитного поля при ее увеличении (кривая 1) и уменьшении (кривая 2) в диапазоне 1.5–7.0 Т

Важной характеристикой соленоида, закороченного сверхпроводниковым ключом, является эффективность ввода в рабочую область внешних магнитных полей. Выражение для изменения магнитного поля  $B$  в центре соленоида при вводе поля развертки или модуляции величиной  $B_0$ , полученное из закона сохранения потокосцепления для замкнутой цепи с нулевым сопротивлением, имеет вид

$$B = B_0 \left[ 1 - \frac{MC_c}{L_c C_p} \right], \quad (1)$$

где  $L_c$  – индуктивность соленоида;  $C_c$ ,  $C_p$  – магнитные постоянные обмоток соответственно соленоида и развертки поля;  $M$  – взаимная индуктивность между ними;  $B_0$  – величина поля развертки для разомкнутого соленоида.

Как следует из выражения (1), эффективность ввода внешних полей, определяемая как отношение  $B/B_0$ , максимальна, если взаимная индуктивность между обмотками соленоида и развертки поля стремится к нулю.

Обмотка развертки (модуляции) намотана на отдельном каркасе и расположена в отверстии соленоида. Для обеспечения эффективного ввода в замкнутый соленоид поля развертки ее обмотка выполнена из трех частей – средней (основной) и двух крайних, включенных встречно средней, что позволяет уменьшить индуктивную связь с обмоткой соленоида примерно на порядок. Внутренний диаметр обмотки развертки 35 mm, наружный – 39.6 mm. Длина средней обмотки 66.8 mm, длина крайних – по 34.4 mm, зазор между средней и крайними обмотками 27.7 mm. Обмотка намотана сверхпроводниковым проводом диаметром 0.33 mm. Крайние обмотки содержат по 534 витка, средняя – 785 витков. Для получения однородного поля развертки средняя обмотка содержит внутренний корректирующий паз высотой, равной высоте двух слоев обмотки, и длиной 36 mm.

Для случая разомкнутого соленоида магнитная постоянная обмотки развертки 0.008 T/A, индуктивность  $1.25 \cdot 10^{-4}$  H, взаимная индуктивность с соленоидом  $1.34 \cdot 10^{-2}$  H. Синусоидальная модуляция в поле соленоида 6.5 T имеет амплитуду 0.05 T на частоте до 10 Hz, а развертка поля – амплитуду  $\pm 0.1$  T. Эффективность ввода полей развертки в центр соленоида составляет 90%, что обусловлено малой величиной взаимной индуктивности.

Измерена стабильность магнитного поля соленоида, закороченного сверхпроводниковым ключом, в зависимости от способа изготовления соединительных контактов между выводами обмотки. Для контактов, паянных припоем ПОС-40, стабильность поля составила  $(2-5) \cdot 10^{-5}$  Oe/h, для контактов, изготовленных холодной сваркой, – не более  $2 \cdot 10^{-8}$  Oe/h.

Сверхпроводниковый соленоид входит в состав криомагнитной системы радиоспектрометра 2-миллиметрового диапазона ЭПР5-04, разработанного Донецким физико-техническим институтом им. А.А. Галкина.

## 2. Сверхпроводниковый соленоид № 2

Отличительными особенностями сверхпроводникового соленоида № 2 (в сравнении с соленоидом № 1) является увеличенный почти в два раза диаметр рабочего отверстия – от 43 до 82 mm и более высокая однородность магнитного поля –  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Oe в объеме  $1 \text{ cm}^3$ . Характеристики поля те же, что для соленоида № 1. Высокая однородность магнитного поля в объеме обеспечивается с помощью сверхпроводниковых корректирующих обмоток для компенсации осевых и радиальных градиентов поля соленоида.

В состав соленоида входят три секции для возбуждения сильного магнитного поля, обмотка развертки поля и обмотки компенсации градиентов магнитного поля – осевых  $dH/dz$ ,  $d^2H/dz^2$  и радиальных  $dH/dx$ ,  $dH/dy$ .

Две внутренние секции соленоида изготовлены по бескаркасной технологии с использованием эпоксидной смолы [7]. Секции намотаны многожильным проводом сплава НТ-50 диаметром 0.7 и 0.5 mm. Первая секция имеет размеры: внутренний диаметр 82 mm, наружный – 108.5 mm, длина –

240 mm. При этом первые шесть слоев намотаны проводом диаметром 0.7 mm с числом витков 1658, последующие шестнадцать слоев – проводом диаметром 0.5 mm с числом витков 7135. В обмотке выполнен внутренний корректирующий паз высотой в два слоя обмотки и длиной 82.5 mm. Размеры второй секции: внутренний диаметр 115 mm, наружный – 138 mm, длина – 240 mm. Секция намотана проводом диаметром 0.5 mm, число витков 8668. Снаружи секций соленоида установлены силовые бандажы из стали 12X18H10T.

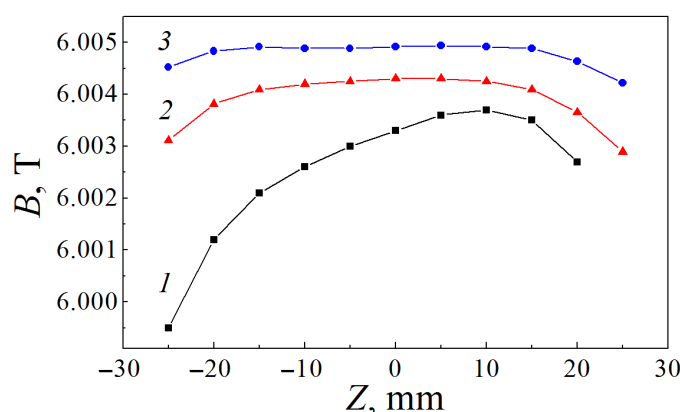
Третья секция намотана проводом диаметром 0.5 mm на каркас из алюминиевого сплава Д16Т и выполнена в виде двух восьмислойных обмоток с зазором между ними 118 mm, которые образуют наружный корректирующий паз. Сверхпроводниковая обмотка развертки магнитного поля намотана на отдельный каркас с внутренним диаметром 70 mm и установлена в отверстии соленоида. Внутренний диаметр обмотки 73 mm, наружный – 79.5 mm, длина – 160 mm. Обмотка содержит шесть слоев, намотанных проводом диаметром 0.5 mm. Для повышения однородности поля развертки в обмотке выполнен наружный паз в один слой длиной 79 mm. Магнитная постоянная обмотки развертки при разомкнутом соленоиде составляет 0.012 T/A, а при замкнутом – 0.0072 T/A, т.е. коэффициент эффективности ввода поля развертки в замкнутый соленоид равен 60%. Остальная часть поля развертки экранируется короткозамкнутой обмоткой соленоида так как в ней наводится ток, магнитное поле которого стремится скомпенсировать поле развертки.

Обмотка компенсации осевого линейного градиента поля  $dH/dz$  выполнена в виде двух встречно-включенных однослойных обмоток по 20 витков из сверхпроводникового провода диаметром 0.38 mm. Межцентровое расстояние между обмотками 138 mm, что обеспечивает равенство нулю градиента поля  $d^3H/dz^3$ .

Обмотка компенсации осевого квадратичного градиента поля  $d^2H/dz^2$  выполнена двухслойной в виде двух пар согласно-включенных обмоток: внутренняя пара соединена встречно внешней паре. Межцентровое расстояние обмоток внутренней пары равно 48 mm, обмоток внешней пары – 135 mm. Число витков в каждой обмотке внутренней пары 50, внешней пары – 100. Такая геометрия обмотки не создает постоянную составляющую поля и четвертого градиента поля  $d^4H/dz^4$ .

Обмотки компенсации линейных радиальных градиентов поля  $dH/dx$  и  $dH/dy$  выполнены в виде четырех однослойных седлообразных обмоток по 25 витков, при этом верхняя и нижняя пары обмотки установлены симметрично медианной плоскости соленоида. Кроме того, обмотка градиента поля  $dH/dx$  развернута относительно обмотки  $dH/dy$  на 90 градусов по азимуту. Обмотки соленоида, развертки поля и компенсации градиентов поля закорочены сверхпроводниковыми ключами, а соединения выводов обмоток выполнены холодной сваркой сверхпроводников с остаточным сопротивлением не более  $10^{-12}$  Ω.

На первом этапе исследований определяли максимальный ток и исходную однородность магнитного поля соленоида. Без перехода в нормальное состояние соленоид выдерживал ток 73 А, создающий в центре соленоида поле с индукцией 6.5 Т. Исходное распределение магнитного поля вдоль оси в центре соленоида представлено на рис. 2 кривой 1, которая характеризуется присутствием линейного градиента поля  $dH/dz$ . При этом однородность поля в центре соленоида составила  $10^4$  Ое/см. Для устранения градиента  $dH/dz$  сверху третьей секции соленоида со стороны меньшего поля дополнительно было намотано 14 витков, включенных согласно с обмоткой соленоида, что позволило более чем на порядок улучшить однородность поля (кривая 2). Суммарное распределение магнитного поля соленоида и поля обмотки развертки при токе в ней 8 А характеризует кривая 3. Из хода кривой видно, что обмотка развертки создает собственное однородное магнитное поле, которое не ухудшает однородность поля соленоида. Максимальная амплитуда развертки поля составляет  $\pm 0.1$  Т при токе 16 А.



**Рис. 2.** Распределение индукции магнитного поля соленоида вдоль оси  $Z$ : 1 – исходное поле после изготовления обмотки, 2 – после докоррекции наружными витками, 3 – после докоррекции наружными витками при токе в обмотке развертки величиной 8 А

На втором этапе исследований проводили настройку высокой однородности поля в рабочей ампуле объемом  $1 \text{ cm}^3$  с помощью обмоток компенсации градиентов поля, а также измеряли долговременную стабильность магнитного поля. В качестве спин-содержащего вещества датчика магнитометра, на котором наблюдали сигнал ядерной магнитной индукции, использовали тяжелую воду  $D_2O$  и водный раствор  $LiCl$ . Датчик со спин-содержащим веществом размещали в антикриостате – «теплом» пальце, обеспечивающем температуру 300 К. Легко достигаемая однородность поля в ампуле объемом  $1 \text{ cm}^3$  составила  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Ое. В обмотках компенсации радиальных градиентов поля  $dH/dx$  и  $dH/dy$  максимальный ток составил 7 А, в обмотке  $dH/dz$  – не превышал 1 А, а в обмотке  $d^2H/dz^2$  – был равен нулю. Долговременная стабильность поля составила не более  $10^{-8}$  Ое/ч.

### 3. Сверхпроводниковый соленоид № 3

Соленоид № 3 отличается еще большим диаметром внутреннего отверстия, который должен быть не менее 101 mm. Это связано с тем, что в отверстии соленоида размещается специальный гелиевый криостат с внешним диаметром 100 mm для создания температуры ниже 1 К путем растворения гелия-3 в гелии-4.

Сначала были выполнены расчеты и выбрана конструкция соленоида, создающего в рабочем отверстии диаметром 101 mm однородное магнитное поле с индукцией 7 Т. Соленоид содержит три силовые секции и изготовлен по бескаркасной технологии [7]. В качестве обмоточного провода служил сверхпроводник сплава HT-50 диаметром 0.7 и 0.5 mm. Для изготовления соленоида использовано 22 kg сверхпроводникового провода. Размеры соленоида приведены в табл. 2. Из таблицы видно, что первая и вторая секции

Таблица 2

Размеры соленоида № 2 и характеристики его обмотки

№ секции	Размеры секции, mm			Корректирующий элемент	Диаметр провода, mm	Количество витков, шт.
	диаметр		длина			
	внутренний	наружный				
1	105.4	123.5	300.0	–	0.7	4898
2	130.0	150.0		–	0.7 0.5	3195 4610
3	157.0	172.5		Наружный паз	0.5	6574

выполнены без корректирующих пазов (что повышает надежность работы соленоида). Это обусловлено тем, что в области расположения пазов появляются нерегулярности укладки витков, неравномерная плотность намотки, щели между витками, которые чаще всего и являются причиной преждевременного перехода соленоида в нормальное состояние, особенно если корректирующий паз находится в области сильного магнитного поля, в которой механические усилия на витки максимальны. В третьей секции наружный паз выполнен в зоне слабого магнитного поля, поэтому приведенные выше факторы практически не влияют на надежность работы соленоида. Размеры паза выбраны из условия компенсации двух первых четных членов разложения поля в степенной ряд одновременно всех трех секций соленоида [3]. Магнитная постоянная соленоида составила 0.0695 Т/А.

При разработке конструкции соленоида рассмотрены два варианта размещения обмотки развертки поля – снаружи соленоида (диаметр внутреннего отверстия составляет 101 mm) и внутри (диаметр отверстия увеличен).

В первом варианте обмотка развертки поля выполнена четырехслойной из провода диаметром 0.33 mm и имеет размеры: внутренний диаметр 182 mm, наружный – 185 mm, длина – 240 mm. Толщину обмотки в четыре слоя выбирали из условия обеспечения магнитной постоянной обмотки на уровне 0.009–0.01 Т/А, а ее длину – из условия обеспечения высокой однородности поля развертки. Требования по величине магнитной постоянной обусловлены ограничениями на ток  $I \leq 16$  А для создания поля развертки амплитудой 0.1 Т. Исследования показали, что эффективность ввода поля развертки в центр замкнутого соленоида составляет всего лишь 12%, а остальная часть (88%) поля развертки экранируется соленоидом.

Во втором варианте обмотка развертки размещается во внутреннем отверстии соленоида и имеет размеры: внутренний диаметр 101.5 mm, наружный – 105 mm, длина – 224 mm. Обмотка выполнена в четыре слоя проводом диаметром 0.33 mm. Эффективность ввода поля развертки составила около 50%. Как следует из выражения (1), для увеличения данного параметра необходимо уменьшить взаимную индуктивность с соленоидом. Известно [8], что взаимная индуктивность пропорциональна корню квадратному из произведения индуктивностей соленоида и обмотки развертки. Индуктивность обмотки определяется ее геометрическими размерами и числом витков, поэтому для соленоида определенных размеров эта величина заданная, и единственный способ уменьшить взаимную индуктивность – снизить индуктивность обмотки развертки поля. Одним из решений является конструкция обмотки, в которой часть витков включена встречно остальной части.

В качестве рабочего варианта выбрана обмотка развертки поля, которая состоит из трех последовательно соединенных обмоток – основной средней и двух крайних, включенных встречно средней. Внутренний диаметр обмотки 101.5 mm, наружный – 105.2 mm. Длина средней обмотки составляет 160 mm, длина крайних – по 50 mm, зазор между средней и крайними обмотками 15 mm. Общая длина обмотки 290 mm. Для повышения однородности магнитного поля в средней обмотке выполнен внутренний паз в один слой обмотки. Число витков в средней обмотке 1510, в крайних – по 525.

Исследования показали, что эффективность ввода поля развертки в замкнутый соленоид составляет не менее 76%. Чтобы повысить этот параметр, не уменьшая при этом магнитную постоянную развертки, необходимо увеличить длину (число витков) крайних обмоток, что для соленоида с



Рис. 3. Обмотки компенсации градиентов магнитного поля



заданной длиной 300 mm было нецелесообразно.

При испытаниях соленоида с целью определения его критических характеристик имела место «тренировка» критического тока – первый переход в нормальное состояние произошел при 82 А, второй – при 97.5 А. Третьи испытания завершились вводом в обмотку соленоида тока величиной 102.2 А без перехода в нормальное состояние, при котором индукция магнитного поля составила 7.1 Т.

Для повышения однородности магнитного поля от исходного уровня  $10^{-5}$  Ое до  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Ое, как и в соленоиде № 2, использовали сверхпроводниковые обмотки компенсации градиентов поля  $dH/dz$ ,  $d^2H/dz^2$ ,  $d^3H/dz^3$ ,  $dH/dx$ ,  $dH/dy$ , установленные на отдельном каркасе снаружи соленоида (рис. 3). Настройку высокой однородности магнитного поля соленоида производили при индукции поля 6 Т. Однородность магнитного поля  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Ое в ампуле объемом  $1 \text{ cm}^3$  обеспечивали оптимальными токами: 2.5–3 А – в обмотке компенсации градиента поля  $dH/dz$ ; 8–10 А – в обмотке  $dH/dx$ ; 6–8 А – в обмотке  $dH/dy$ ; 1–2 А – в обмотке  $d^2H/dz^2$ . В обмотке компенсации градиента поля  $d^3H/dz^3$  ток был равен нулю.

Сверхпроводниковые соленоиды № 2 и 3 были изготовлены для Физической лаборатории Вихури департамента физики и астрономии университета г. Турку, Финляндия.

### Выводы

1. При увеличении и уменьшении магнитного поля сверхпроводникового соленоида в диапазоне 1.5–7 Т изменение однородности поля не превышает  $3 \cdot 10^{-5}$  Ое/см.

2. Эффективный ввод поля развертки (модуляции) в короткозамкнутую обмотку соленоида обеспечивается путем уменьшения взаимоиндукции между обмотками соленоида и развертки поля.

3. Однородность магнитного поля на уровне  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  Ое в  $1 \text{ cm}^3$  обеспечивается за счет применения сверхпроводниковых обмоток компенсации осевых и радиальных градиентов поля.

4. Стабильность магнитного поля короткозамкнутого соленоида составляет  $(2-5) \cdot 10^{-5}$  Ое/ч для контактов, паянных припоем ПОС-40, и не более  $2 \cdot 10^{-8}$  Ое/ч при изготовлении соединительных контактов холодной сваркой сверхпроводников.

1. В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, Н.В. Таряник, В.В. Сухой, В.В. Шапаренко, ПТЭ № 6, 154 (1982).
2. В.И. Курочкин, А.Я. Лаптиенко, Н.В. Таряник, В.П. Луценко, ПТЭ № 2, 183 (1983).
3. Д. Монтгомери, Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов, Мир, Москва (1971).

4. В.В. Сухой, В.В. Пермяков, В.И. Курочкин и др., в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: фундаментальная и прикладная сверхпроводимость, ХФТИ АН УССР, Харьков (1976), вып. 1(4), с. 50.
5. P.R. Aron, Rev. Scient. Instrum. **35**, № 1, 33 (1964).
6. В.В. Шапаренко, В.В. Пермяков, А.Н. Пересадченко, Л.Е. Надеина, в сб.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: фундаментальная и прикладная сверхпроводимость, ХФТИ АН УССР, Харьков (1976), вып. 1(4), с. 39.
7. А.с. СССР №1210443 «Полимерная композиция».
8. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин, Расчет индуктивностей, Энергоатомиздат, Ленинград (1986).
9. А.А. Глущенко, А.Я. Лаптиенко, Н.Н. Карагай, В.И. Курочкин, Измерительная техника № 6, 56 (1984).

*D.V. Varyukhin, N.V. Taryanik, E.A. Dvornikov, D.O. Fedyuk*

## SUPERCONDUCTING SOLENOIDS FOR A RADIO SPECTROMETER OF ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE

The results are reported, concerning the design of three superconducting solenoids targeted at the tests of the material properties by electron paramagnetic resonance within the range of 2 mm. Within the central zone, the solenoids form magnetic field characterized by the density up to 7.5 T. To adjust high homogeneity of the magnetic field, superconducting coils are applied that compensate axial and radial gradients of the solenoid field. A number of constructions of scanning coils and magnetic field modulation are tested. The optimum construction is selected that provides effective entrance of the scanning field and the modulation field to the solenoid. The stability of the magnetic field is measured in the short-circuit mode of a solenoid depending on the technique of manufacturing of the connection contacts of superconductors.

**Keywords:** superconducting solenoid, coil of scanning and modulation of magnetic field, field homogeneity, field density and mutual induction, vacuum permeability, efficiency of entrance of the scanning and modulation field, correction coils, magnetic field gradient, field stability

**Fig. 1.** Magnetic field density dependence of homogeneity at the field density increase (curve 1) and decrease (curve 2) within the range of 1.5–7.0 T

**Fig. 2.** Distribution of the density of the magnetic field of the solenoid along Z axis: 1 – the original distribution after the manufacturing of the coil, 2 – after additional correction by external turns, 3 – after additional correction by external turns; the current in the scanning coil is 8 A

**Fig. 3.** Coils of compensation of the magnetic field gradients