

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.087.92

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА УСКОРЕННОГО СТАРЕНИЯ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

© 2024 г. К. К. Рябченко^{а,*}, А. Ю. Пахомов^а, К. В. Жилиев^а, А. А. Старостенко^а

^аИнститут ядерной физики им. Г. И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11
*e-mail: K.K.Ryabchenko@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 07.09.2023 г.

После доработки 23.09.2023 г.

Принята к публикации 20.11.2023 г.

Для измерения пространственного распределения магнитного поля используются либо одиночные датчики Холла, либо массивы из них. В большинстве случаев достаточно набора размещенных на токопроводящей подложке датчиков Холла. Готовое устройство называют измерительной кареткой. В статье описывается первый этап ее создания, который заключается в отбраковке датчиков Холла, в ходе которого сенсоры работают в экстремальных условиях эксплуатации (при повышенных электрических и тепловых нагрузках). В процессе этого так называемого ускоренного старения контролировались изменения величин остаточного напряжения, температурных коэффициентов, нелинейности и расходимости коэффициента чувствительности. Данное исследование может являться методическим руководством при определении критериев отбора датчиков Холла для прецизионных измерительных систем. Помимо этого, была показана необходимость проведения старения датчиков для стабилизации их долговременных характеристик. Также описан процесс отбраковки датчиков по интересующим параметрам.

DOI: 10.31857/S0032816224030137 EDN: OUVCTG

1. ВВЕДЕНИЕ

Для современных задач физики высоких энергий, которые решаются на действующих ускорительных комплексах, требуются создание и контроль параметров магнитных систем с высокой точностью. Так, например, для накопительного кольца проекта FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) требуются дипольные магниты с интегральной однородностью величины магнитного поля в рабочей области на уровне 10^{-4} [1]. При этом значения магнитных полей, получаемых при измерениях готовых изделий, не должны отличаться от расчетных на относительную величину более $5 \cdot 10^{-4}$. Изготовление магнитных элементов с заявленной точностью предполагает также и возможность измерения соответствующих величин на уровне не хуже 10^{-5} . Для измерения магнитных полей

готовых элементов используются несколько независимых методик измерения, основанные в том числе на индукционном или магнитооптическом методах, ядерном магнитном резонансе, эффекте Холла, а также иных методах [2]. В частности, для измерений характеристик магнитных элементов перепускного канала НЕВТ (High Energy Beam Transport), а также накопительного кольца FAIR была спроектирована и создана измерительная каретка с датчиками Холла. Данная работа посвящена описанию этапа отбраковки датчиков Холла, используемых в упомянутой выше измерительной системе.

2. СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ КАРЕТКИ

В качестве измерительного элемента возможен вариант с использованием одиночного датчика Холла (одномерного или двумерного [3]).

Преимущество данного способа в относительно простой реализации измерительной каретки (как при выборе датчика, так и при конструировании). Недостаток — в длительном измерительном процессе, требующем, помимо всего, многокоординатной прецизионной системы линейного перемещения.

В представленной статье использовался набор размещенных на токопроводящей подложке датчиков Холла, включающих токовые и потенциальные контакты с несколькими независимыми друг от друга сенсорами. Недостаток такой конструкции в том, что при долгой эксплуатации возможное ухудшение параметров у одного из датчиков или выход его из строя приведет к потере качества измерений, что компенсируется возможностью замены датчика. Измерительная каретка может работать годами, однако, бывают случаи, когда она выходит из строя не из-за поломки сенсора, а по причине условий, в которых она работает, например, из-за механического воздействия на каретку или кабель, заливания водой или другими жидкостями. Помимо этого, возможна деградация непосредственно в самих датчиках: поскольку провода на датчике припаяны на близком расстоянии друг к другу, со временем происходит деградация припоя, в результате чего он начинает хлопьями отслаиваться. Это, в свою очередь, приводит к замыканию соседних контактов, и датчик выходит из строя.

Преимуществами сделанного выбора являются:

- скорость измерений, ведь каретка за один проезд охватывает интересующую область поля у большей части магнитов, исходя из их спецификаций;
- фиксированное расстояние между датчиками, что упрощает измерения градиентных полей.

Для измерений полей магнитных элементов в рамках проектов NEBT и CR FAIR была изготовлена каретка, состоящая из 17 датчиков. Сама измерительная каретка (рис. 1) представляет из себя медное основание, на котором размещаются:

- печатная плата для распайки всех необходимых элементов;
- нагревательная катушка, намотанная бифилярно и необходимая для нагрева каретки;
- измерительная катушка, намотанная бифилярно и подключенная к одному из плеч резистив-

ного моста, который при разбалансировке будет подавать ток в нагревательную катушку до тех пор, пока плечи моста не вернуться в согласованное состояние (работает только для нагрева);

- платиновый терморезистор, предназначенный для измерения температуры в каретке;
- молибденовая пластина, прикрепленная на медное основание при помощи болтов;
- датчики (рис. 2), приклеенные на пластину с помощью теплопроводящего клея АлСил-5;
- алюминиевая крышка, накрывающая каретку сверху, для защиты датчиков и печатной платы от воздействия внешней среды.

Помимо этого, в каретке имеются технологические отверстия для установки дополнительных элементов с целью коррекции положения, а также дополнительного оборудования (угловой отражатель) для точного определения координаты при линейном перемещении.

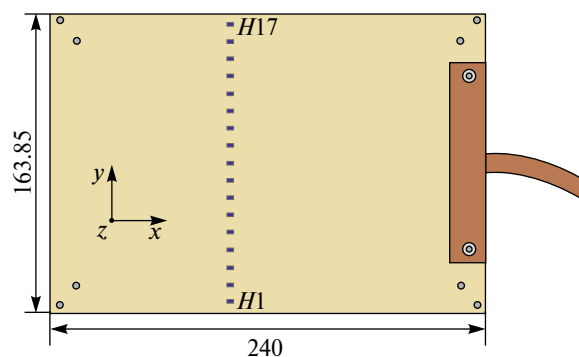


Рис. 1. Двумерная схема каретки с 17 датчиками Холла H_i , $i = 1, \dots, 17$.

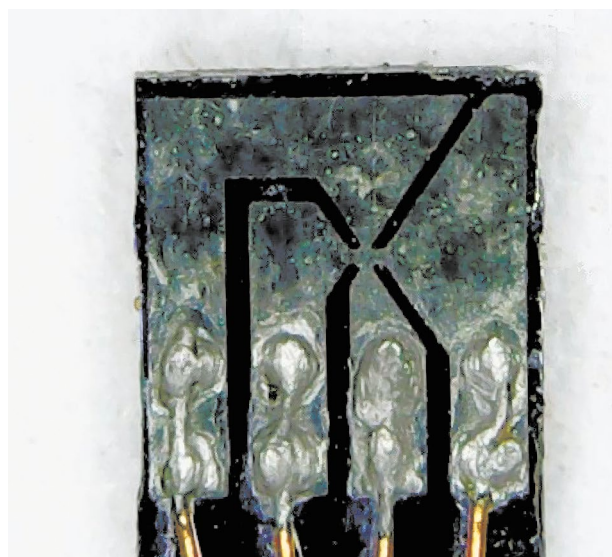


Рис. 2. Датчик Холла типа ПХЭ 603118Б.

3. ОТБРАКОВКА ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

В данной работе проводились исследования датчиков Холла типа ПХЭ 603118Б (рис. 2). Конструктивно данный преобразователь состоит из подложки прямоугольной формы монокристалла арсенида галлия (GaAs — черный цвет) толщиной 350 мкм, сверху — напыление из антимонида индия (InSb — серебристый цвет) толщиной 10 мкм, выводы выполнены из медной проволоки диаметром 0.06 мм. Размеры преобразователя равны $3 \times 2 \times 0.6$ мм³ (с учетом пайки выводов), а размеры чувствительной области — 0.1×0.05 мм², ток питания — 100 мА.

Основные паспортные характеристики одного из датчиков используемого типа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные паспортные данные датчика Холла типа ПХЭ 603118Б

Остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$	30 мкВ
Магнитная чувствительность γ при $B = 1$ кГс	6.13 мкВ/Гс
Коэффициент нелинейности при $B = 20$ кГс	0.3%
Температурный коэффициент чувствительности при $B = 1$ кГс	0.004%/°C
Температурный коэффициент остаточного напряжения	0.2 мкВ/°C

Измерения основных параметров датчиков Холла проводились в специальной медной каретке (рис. 3), в которой предусмотрена возможность быстрой установки и замены 10 датчиков. Нагрев каретки осуществляется с помощью

элементов Пельтье, которые дают возможность изменять температуру в медной пластине от 0°C до 65°C в течение нескольких минут; измерение температуры с точностью не хуже 0.1°C проводится вмонтированным в каретку платиновым терморезистором. Питание датчиков осуществляется с помощью прецизионного источника тока Keithley 6221А, напряжение через коммутатор измеряется нановольтметром Keithley 2182А.

Исследования датчиков проводились в калибровочном дипольном магните (КДМ) [4], в качестве источника питания магнита использовался источник стабилизированного тока ИСТ 2500-150, шум которого составляет 1 мА во всем диапазоне токов. Для регистрации магнитного поля использовались датчики ядерного магнитного резонанса (ЯМР), погрешность измерения которых составляет менее $3 \cdot 10^{-6}$ (при относительном градиенте поля менее $4 \cdot 10^{-4}$ см⁻¹) [5]. На рис. 4 представлена зависимость однородности магнитного поля, измеренная с помощью 16 датчиков ЯМР в области 10×160 мм², от величины поля.

При определении магнитных и температурных характеристик датчики Холла помещались в медианную плоскость межполюсного зазора, в которой однородность магнитного поля достигает уровня не хуже 10^{-4} в области $20 \times 20 \times 200$ мм³. Ширина медной подложки в используемой каретке составляет 100 мм, что заведомо больше размеров области однородного поля, следовательно, для исследуемых датчиков Холла не важно пространственное расположение. Вся система использовалась для отбора большого количества датчиков (более 100 штук), поэтому требовалось

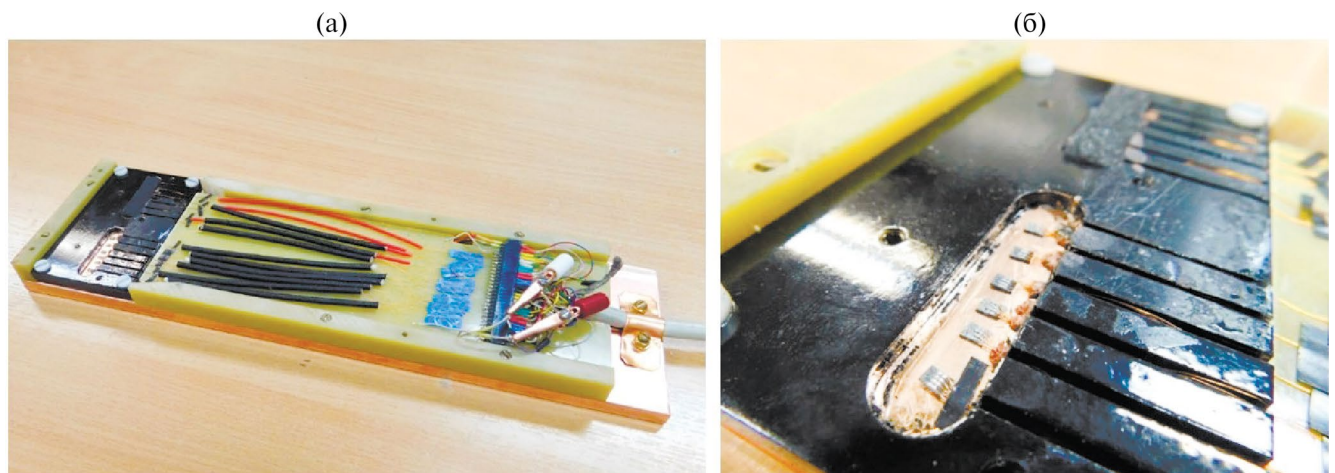


Рис. 3. Каретка для отбраковки датчиков Холла.

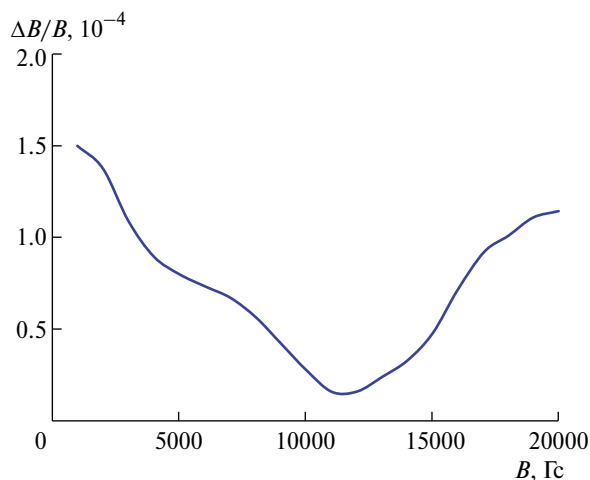


Рис. 4. Однородность магнитного поля в калибровочном магните.

их быстрое монтирование и демонтирование с точностью расположения ± 1 мм с расстоянием между центрами элементов в 5 мм.

4. ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДИКА ОТБОРА ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

Скорость изменения параметров датчиков со временем эксплуатации замедляется, поэтому для стабильной работы измерительной системы необходимо проводить испытания и цикл старения. Их целью являются перевод датчиков в более устойчивый режим (в котором изменение характеристик происходит медленно) и последующий отбор датчиков с наилучшими параметрами.

Чаще всего характеристики датчиков после старения в той или иной степени ухудшаются (однако на практике наблюдались случаи улучшения показателей датчиков после проведения старения).

Существуют два основных способа осуществления старения: повышенная электрическая нагрузка и тепловое воздействие. Возможны и их комбинации. Повышенная температура при проведении ускоренного старения приводит к ускоренной деградации в полупроводнике, которая ведет к изменениям параметров датчика. Таким образом, если после процедуры ускоренного старения значения характеристик датчика остаются в требуемых пределах, предъявляемых в паспорте испытуемого элемента, то можно полагать, что выход параметров датчика за установленные пределы со временем и вероятность его отказа будут минимальны.

Методику отбраковки датчиков можно разделить на несколько этапов.

1. Внешний осмотр поверхности датчика и качества пайки контактов под микроскопом.

2. Определение основных параметров датчика:

- измерение вольт-амперной характеристики (зависимости остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ от управляющего тока);
- построение зависимости магнитной чувствительности датчика γ от внешнего магнитного поля;
- определение коэффициентов чувствительности (отношение, характеризующее ЭДС Холла, приходящуюся на единицу магнитной индукции, $\gamma = U / B$), расходимости (отношение значений магнитной чувствительности при рассматриваемом значении магнитной индукции к чувствительности при противоположном по знаку значении магнитного поля, $(\gamma(B) / \gamma(-B) - 1) \cdot 100\%$), нелинейности (отношение магнитной чувствительности при рассматриваемом значении магнитной индукции к чувствительности в поле 1 кГс, $(\gamma(B) / \gamma(B=1 \text{ кГс}) - 1) \cdot 100\%$ [6]);
- определение температурных коэффициентов для остаточного напряжения (ТКОН) в постоянных полях $B = 0, 10$ кГс, а также температурных коэффициентов чувствительности (ТКЧ);
- проверка стабильности показаний на пермалоевом экране в течение длительного времени (не менее 24 ч).

3. Старение датчиков Холла в постоянном магнитном поле ($B = 25$ кГс) при повышенной температуре ($T = 80^\circ\text{C}$) при превышении номинального тока питания датчика в 2 раза (200 мА) в течение длительного времени ($t = 40$ ч). После этого, примерно через 24 ч, проверяются восстановление и стабильность показаний датчиков (повторение второго этапа).

4. По полученным данным датчики классифицируются по степени отклонения параметров от паспортных данных и отбраковываются.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

В данной статье приведены данные об отбраковке 9 датчиков Холла типа ПХЭ 603118Б. Результаты измерений основных характеристик

датчиков до и после процесса ускоренного старения представлены в табл. 2, 3 соответственно. Стоит отметить, что все измерения (кроме вольт-амперной характеристики, ВАХ) проводились при одной полярности тока. Следовательно, при дальнейшем использовании датчиков необходимо учитывать полярность тока, при которой они были отбракованы.

Рассмотрим более подробно каждый из параметров для датчиков № 3 и № 7.

ВАХ (зависимость остаточного напряжения от тока питания) представлена на рис. 5а, б. На рисунках видно, что ВАХ может иметь различную форму: как линейную, так и параболическую, следовательно, на одной из полярностей

тока сигнал близок к нулю и с ростом тока практически не изменяется.

$U_{\text{ост}}$ находится в одной цепи с полезным сигналом и является помехой, вредным фоном, величина которого должна быть небольшой. Основной причиной появления остаточного напряжения является расположение контактов в не эквипотенциальных точках. Если датчик неоднороден и его разные участки имеют различные температурные коэффициенты, то $U_{\text{ост}}$ будет зависеть от температуры. То же самое относится и к контактным сопротивлениям, которые могут изменяться во времени. Градиенты температур могут быть в значительной степени уменьшены либо улучшением теплового контакта датчика с хорошо проводящей

Таблица 2. Основные характеристики датчиков Холла до процесса ускоренного старения

№	$U_{\text{ост}},$ мкВ	$\gamma,$ мкВ/Гс	Расход (1кГс), %	Нелинейность при положитель- ном B , %	Нелинейность при отрицатель- ном B , %	ТКОН, мГс/°С	ТКЧ (-10 кГс), мГс/°С	ТКЧ (10 кГс), мГс/°С
1	205	9.0	0.27	1.92	2.94	-200	600	-1380
2	-292	8.5	-0.25	2.33	1.46	360	1000	-110
3	41	8.4	0.16	2.43	3.06	-50	1340	-1660
4	37	9.5	-0.06	0.47	0.27	60	-20	160
5	118	11.0	-0.02	0.52	0.46	50	10	80
6	76	8.4	-0.01	0.87	0.89	-80	-70	-130
7	21	9.6	-0.03	0.41	0.30	-20	-80	120
8	-18	10.3	0.01	0.30	0.34	30	-70	70
9	41	9.5	-0.04	0.41	0.34	30	-110	140

Таблица 3. Основные характеристики датчиков Холла после процесса ускоренного старения

№	$U_{\text{ост}},$ мкВ	$\gamma,$ мкВ/Гс	Расход (1кГс), %	Нелинейность при положи- тельном B , %	Нелинейность при отрица- тельном B , %	ТКОН, мГс/°С	ТКЧ (-10 кГс), мГс/°С	ТКЧ (10 кГс), мГс/°С
1	213	8.9	0.24	1.84	2.72	-220	540	-1320
2	-271	8.5	-0.24	2.22	1.42	390	1020	-50
3	4	8.3	0.14	2.31	2.88	-50	1210	-1480
4	56	9.5	-0.07	0.44	0.27	30	-30	160
5	137	11.0	-0.04	0.48	0.46	40	-10	100
6	88	8.4	-0.02	0.81	0.84	-80	-90	130
7	13	9.6	-0.04	0.39	0.29	-10	-110	130
8	-30	10.3	0.01	0.23	0.34	10	-120	120
9	38	9.5	-0.02	0.42	0.34	10	-120	160

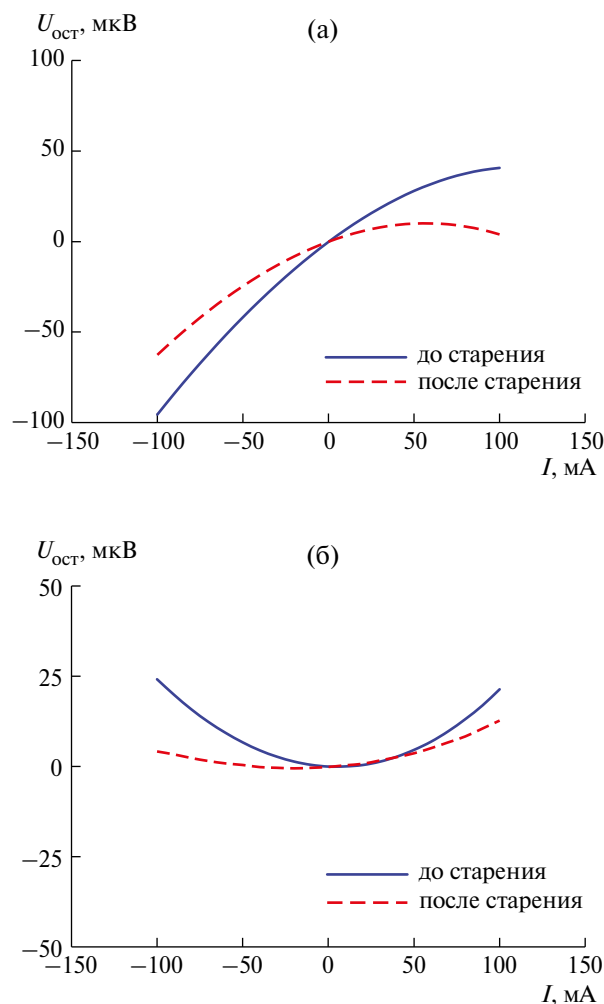


Рис. 5. ВАХ остаточного напряжения для третьего (а) и седьмого (б) датчиков Холла.

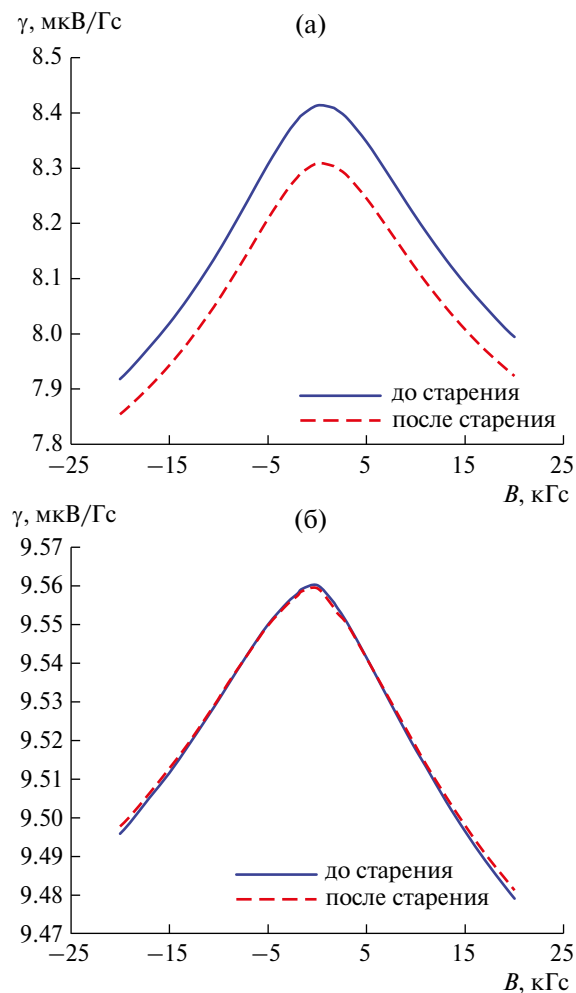


Рис. 6. Зависимость магнитной чувствительности третьего (а) и седьмого (б) датчиков Холла от магнитного поля.

тепло средой, либо, наоборот, уменьшением потоков тепла на датчик путем его теплоизоляции от окружающей среды. Из табл. 2, 3 следует, что процесс ускоренного старения не только уменьшает $U_{ост}$, но и увеличивает его у части датчиков. Вероятными причинами являются изменение величины термоэдс между контактами датчика, каждый из которых является соединением медного вывода с полупроводниковым материалом, химические реакции в полупроводнике, а также деформация чувствительной области.

После проведения калибровки датчиков Холла в КДМ с помощью датчиков ЯМР можно построить зависимость магнитной чувствительности датчиков Холла от магнитного поля (рис. 6).

Из анализа табл. 2, 3 следует, что старение датчиков способствует незначительному

уменьшению чувствительности, расходимости и нелинейности. Параметры датчиков, полученных одним и тем же путем, могут существенно различаться, даже если они из одной партии. Это связано с множеством причин, обсуждение которых выходит за рамки этой статьи.

Наибольшее влияние на дрейф сигнала в датчиках оказывает температура. На рис. 7 представлены зависимости показаний датчиков, расположенных в магнитном экране, при изменении температуры.

На рис. 8, 9 показано влияние изменения температуры на сигнал с датчиков, помещенных в постоянное магнитное поле величиной $\pm 10 \text{ кГс}$.

Помимо этого, после процесса старения наблюдается значительное уменьшение температурных коэффициентов остаточного напряжения в отличие от температурных коэффициентов чувствительности.

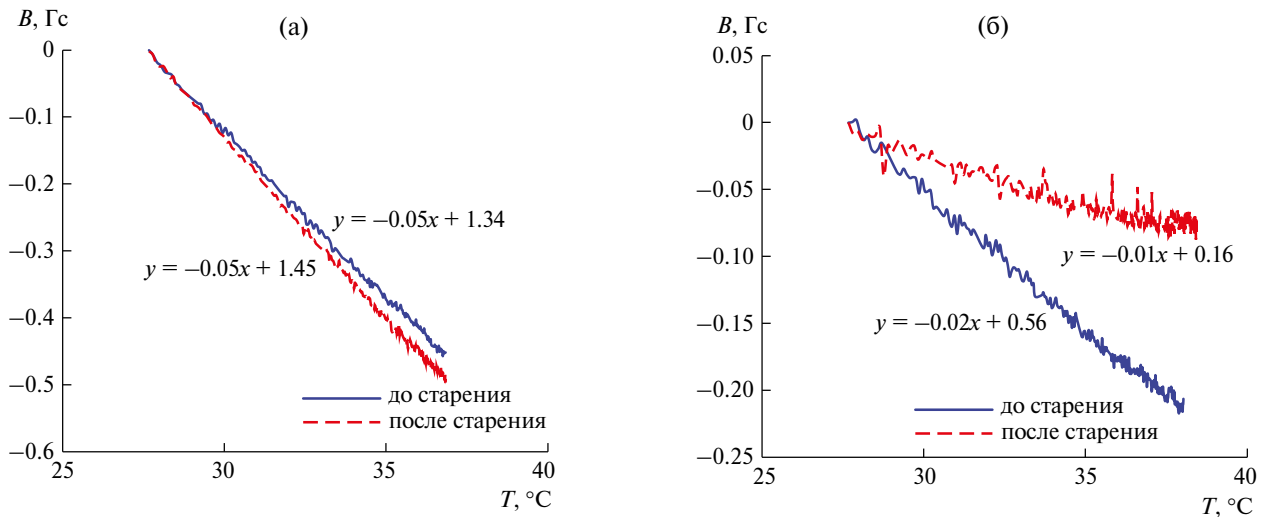


Рис. 7. Зависимость показаний датчиков Холла, расположенных в магнитном экране, от температуры: **а** — третий датчик, **б** — седьмой датчик.

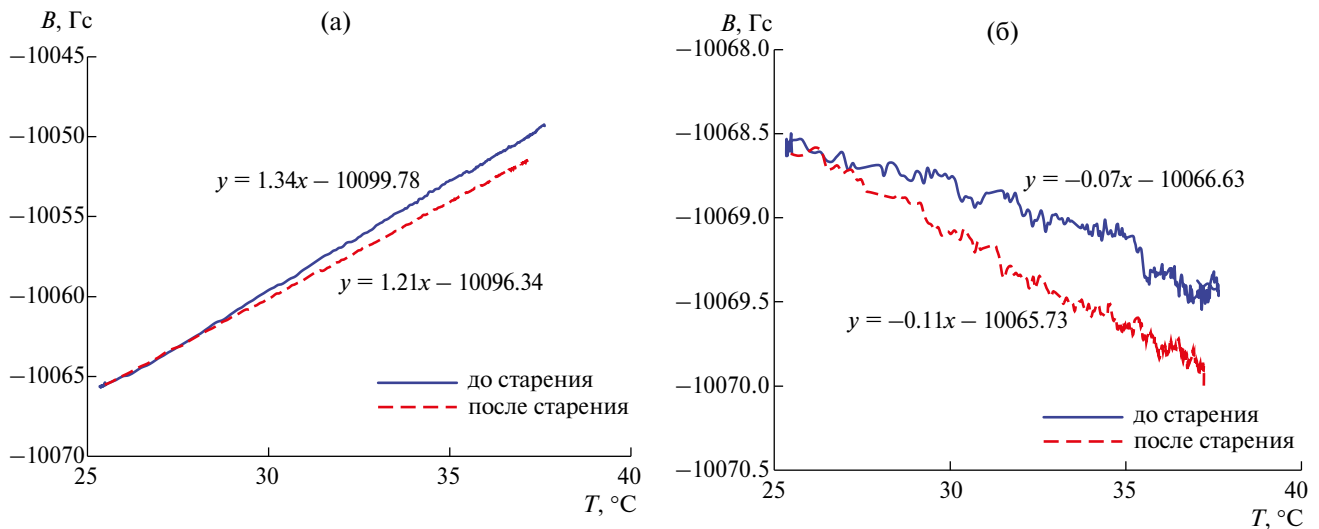


Рис. 8. Зависимость показаний датчиков Холла, расположенных в поле -10 кГс, от температуры: **а** — третий датчик, **б** — седьмой датчик.

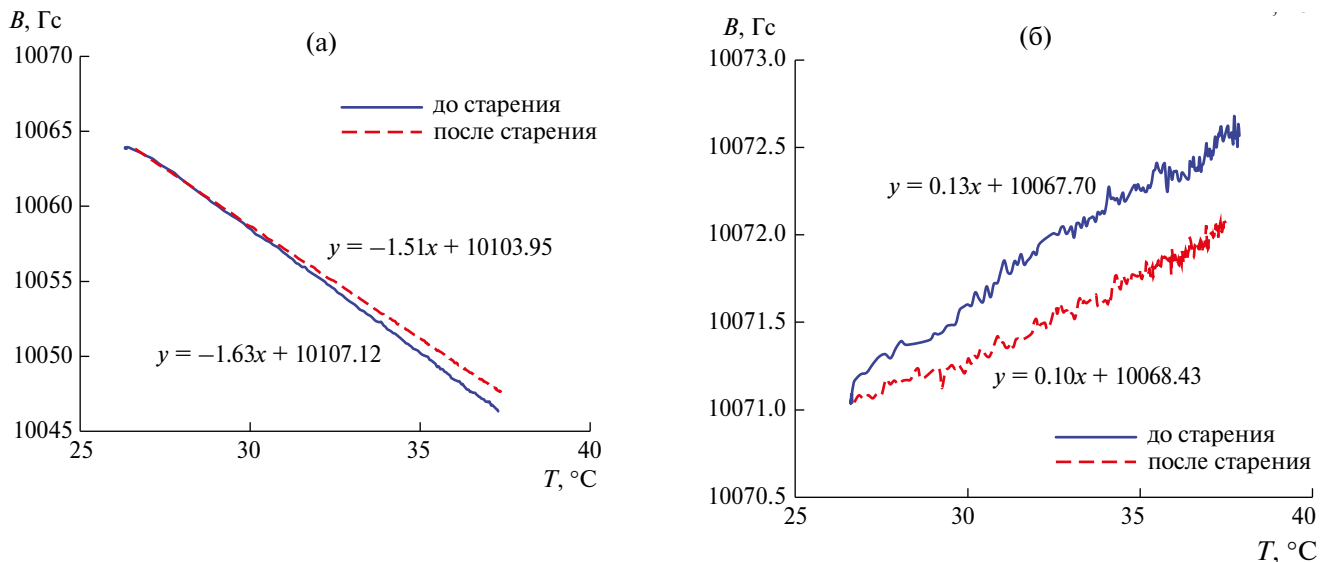


Рис. 9. Зависимость показаний датчиков Холла, расположенных в поле 10 кГс, от температуры: **а** — третий датчик, **б** — седьмой датчик.

6. ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

На рис. 10, 11 показана долговременная стабильность (42 ч) датчиков, экранируемых от внешнего магнитного поля с помощью пермаллового экрана. Дрейф показаний датчиков связан с изменением температуры и подтверждает правильность определения температурных коэффициентов остаточного напряжения.

По результатам, представленным в табл. 3, и долговременному поведению, происходит сортировка датчиков. В первую очередь отбраковываются датчики с большими остаточными напряжениями и температурными коэффициентами, поскольку в процессе эксплуатации эти датчики ведут себя нестабильно, даже при использовании термостабилизации каретки

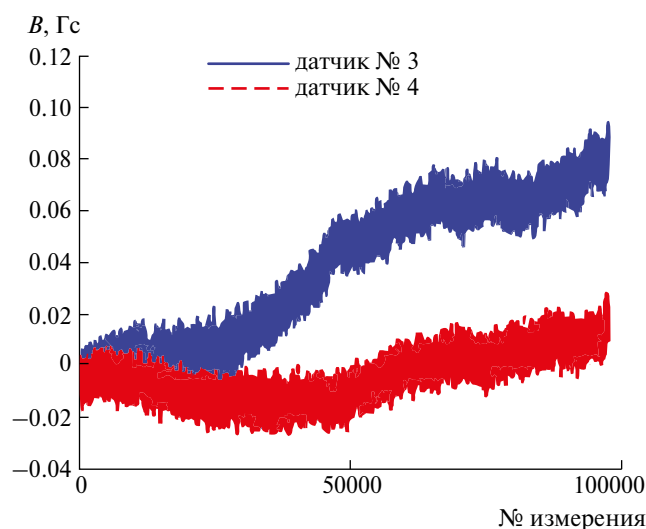


Рис. 10. Долговременная стабильность датчиков, экранируемых от магнитных полей.

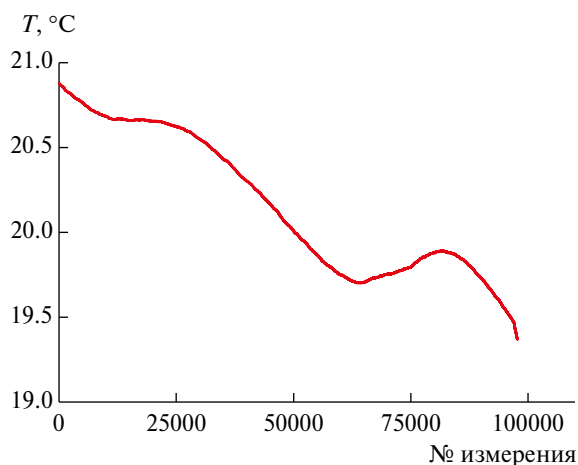


Рис. 11. Температура каретки при измерении долговременной стабильности датчиков, экранируемых от магнитных полей.

и после нескольких месяцев использования погрешность измерения может сильно увеличиться. Требования к коэффициентам расходимости и нелинейности не такие жесткие, так как вносимую ими ошибку можно скорректировать.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя влияние процесса ускоренного старения на основные характеристики датчиков Холла, из партии, состоящей из 9 исследуемых датчиков Холла, в результате 7 было отбраковано. Было отобрано 2 штуки (номера 7, 9) с лучшими характеристиками, а именно, остаточным напряжением $U_{ост} = 21, 41$ мкВ соответственно, температурными коэффициентами остаточного напряжения соответственно 30, 30 мГс/°C, температурными коэффициентами чувствительности для 10 кГс (–10 кГс), равными 130 (70), 140 (110) мГс/°C. После старения показатели 7-го и 9-го датчиков значительно улучшились: остаточное напряжение снизилось на 38% и 7% соответственно, температурные коэффициенты остаточного напряжения — на 66%, температурные коэффициенты чувствительности почти не изменились (у 7-го датчика не изменились совсем, у 9-го — повысились на 8–12%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Riabchenko K.K., Pakhomov A.Yu., Rybitskaya T.V., Starostenko A.A., Tsyganov A.S., Zhiliaev K.V.* // International Particle Accelerator Conference. 2021. P. 2367.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB364>
2. *Павленко А.В.* Многофункциональные цифровые интеграторы для прецизионных измерений магнитных полей в элементах ускорителей. Дисс. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 2015.
3. *Xiao Feng Zhao, Jing Ya Cao, Yu Song, Dian Zhong Wen, Qian Ru Lin, Lei Tian* // Key Engineering Materials. 2014. V. 609-610. P. 1066.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.1066>
4. *Рябченко К.К., Пахомов А.Ю., Рыбцкая Т.В., Старостенко А.А.* // ПТЭ. 2019. № 6. С. 117.
<https://doi.org/10.1134/S0032816219060132>
5. *Карнов Г.В.* ЯМР-магнитометр. Препринт. Новосибирск: Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, 2013.
6. *Турецкий А.В., Шуваев В.А.* Физические основы получения информации. Часть 2. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2012. С. 20.