

О возможности использования миллитесламетров ТПУ в качестве рабочих эталонов

Ю.И. КАЗАНЦЕВ, А.А. МАРТЫНЮК, Е.В. ДРОБАХ, В.И. ГУСЕВ

Доверительная граница погрешности измерений рабочих эталонов 2-го разряда единицы магнитной индукции постоянного поля установлена ГОСТ 8.030-2013 [1] в пределах 1,5 %. Это открывает возможности использования холловских миллитесламетров в качестве рабочих эталонов 2-го разряда, если экспериментально доказаны достаточная стабильность их метрологических характеристик и требуемая точность измерений. В статье рассмотрены и проанализированы результаты периодических поверок в ФБУ «Ростест-Москва» в течение 2007 – 2013 гг. 73 холловских миллитесламетров ТПУ (номер в госреестре 28134), которые выпускаются в настоящее время ООО «ЗЭТ» по документации ЦЕКВ 411171.001, технические условия ТУ 4222-001-56734062-2004, в режиме измерения постоянного магнитного поля. Показано, что погрешности, установленные при первичных поверках, за время эксплуатации приборов не претерпевают существенных изменений, нестабильность показаний большинства миллитесламетров ТПУ в оцифрованных точках (точках поверки) не превышает 1,0 %, а для значительной группы приборов не превышает 0,5 %. Подтверждена возможность использования миллитесламетров ТПУ в качестве рабочих эталонов единицы магнитной индукции постоянного поля 2-го разряда по ГОСТ 8.030-2013.

Ключевые слова: тесламетры, рабочие эталоны единицы магнитной индукции, погрешность измерений, нестабильность, преобразователи Холла.

Стандартом [1] установлено, что в области постоянных магнитных полей для рабочих эталонов 2-го разряда доверительная граница δ_0 погрешности измерений ($P = 0,95$) составляет от 0,02 до 1,5 %. Это позволяет в обоснованных случаях использовать в качестве рабочих эталонов 2-го разряда для диапазона измерений от 0,02 до 2 Тл не обязательно ядерно-резонансные (ЯМР) тесламетры, но и гораздо более доступные и удобные в работе холловские приборы. С другой стороны, в соответствии с рекомендацией [2] относительное значение неоднородности магнитного поля в рабочем объеме источника магнитного поля для поверки тесламетров Холла не должно превышать $1/5 \delta_0$, где δ_0 – допускаемое значение относительной погрешности поверяемого прибора. Однако, при этом, если в качестве рабочего эталона используется ЯМР тесламетр, однородность поля должна удовлетворять условиям его работы. Т.е., рекомендация допускает не очень высокие требования к однородности магнитного поля, но для наблюдения сигнала ядерного магнитного резонанса требуется его высокое качество. С учетом указанных обстоятельств представляется целесообразным рассмотреть возможности использования в качестве рабочего эталона 2-го разряда для поверки и калибровки тесламетров с пределом допускаемой относительной погрешности 2 – 3 % холловского тесламетра, применение которого не требует высокой однородности магнитного поля. При этом, конечно, надо учитывать, что, в отличие от ЯМР тесламетров, реализующих абсолютный метод измерения магнитной индукции, холловские тесламетры безусловно нуждаются в градуировке и периодических поверках.

Миллитесламетры портативные универсальные ТПУ выпускаются с 2006 г. (сначала ЗАО «НПЦентр», затем по той же документации, на тех же производственных площадях и тем же персоналом – ООО «ЗЭТ») для использования, главным образом, в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Миллитесламетры включают в себя электронный блок и измерительные зонды «М» и «С» с измерительными преобразователями Холла (ПХ).

Приемлемые значения параметров миллитесламетров ТПУ, существенные с точки зрения использования их в качестве эталонов, обеспечены следующими схемотехническими решениями:

- управляющий ток ПХ «привязан» к опорному напряжению АЦП. В случае дрейфа одного из этих параметров второй будет изменяться пропорционально и синхронно первому, что уменьшает температурный дрейф и случайную погрешность измерений и способствует долговременной стабильности прибора;
- в схеме миллитесламетра использованы прецизионные малошумящие операционные усилители ОР07 с малым напряжением смещения, высокими коэффициентом усиления и долговременной стабильностью, что обеспечивает хорошую линейность измерений и стабильность прибора;
- применение интегрирующего АЦП позволяет обеспечить приемлемую помехоустойчивость прибора и снизить случайные погрешности измерений до уровней, которые при использовании дисплея $3\frac{1}{2}$ разряда практически не заметны.

Важным элементом, определяющим метрологические характеристики миллитесламетра, является измерительный ПХ. В миллитесламетре ТПУ используются измерительные ПХ типа ИМ104А-1 на основе субмикронных гетероэпитаксиальных структур $n\text{InSb-iGaAs}$. Эти преобразователи изготавливаются компанией «Магнитэкс», г. Санкт-Петербург. Они являются дальнейшим развитием ПХ на основе антимонида индия типа ПХЭ с различной концентрацией носителей заряда, которые в больших количествах выпускались в СССР. В свое время нами были проведены обстоятельные исследования этих преобразователей в температурном диапазоне от температуры кипения жидкого гелия до комнатной и была показана высокая стабильность их параметров [3].

Оригинальный механизм управления нелинейностью преобразования в ПХ типа ИМ104А-1 как функции геометрических параметров ПХ и концентрации носителей заряда обеспечивает в диапазоне концентрации носителей $(0,7 - 1,2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ коэффициент нелинейности на уровне $(0,2 - 0,5) \%$ при значениях магнитной индукции от единиц миллитесла до 2 Тл. ПХ типа ИМ 104А-1 имеют на порядок большую удельную магнитную чувствительность, чем ПХ типа ПХЭ, что позволяет использовать сравнительно небольшой управляющий ток, при котором не возникает проблем теплоотвода для исключения перегрева ПХ. Температурный коэффициент чувствительности в диапазоне температур от минус 60 до $+125^\circ\text{C}$ не превышает $0,03 \%/^\circ\text{C}$. Расходимость при 2 Тл обеспечивается на уровне 1 %. Для уменьшения индукционной наводки выводы ПХ выполнены тонким проводом и тщательно свиты между собой.

Для определения возможности применения миллитесламетров ТПУ в качестве рабочих эталонов представляет интерес оценка погрешности измерений и временной стабильности приборов по результатам их периодических поверок. Напомним, что, согласно [4], стабильность эталона является одним из основных показателей его точности.

Значительная часть миллитесламетров ТПУ проходила и проходит периодические поверки в ФБУ «Ростест-Москва». При этом используется установка УПТ-2 для поверки измерителей магнитной индукции, использующих эффект Холла (государственный рабочий эталон 3.1.ZMA.0313.2015), которая имеет исключительно высокие характеристики однородности и стабильности магнитного поля вплоть до значений индукции 2 Тл.

Еще в 2013 г. были проанализированы результаты периодических поверок 73 миллитесламетров ТПУ различных исполнений за период с 2007 г. по ноябрь 2013 г., всего 260 протоколов поверок. Поверки всех приборов выполнялись при одних и тех же значениях магнитной индукции, которые выставлялись по сигналу ЯМР, в одной и той же точке межполюсного пространства электромагнита (таблица 1).

Таблица 1. Сведения о количестве миллитесламетров ТПУ, прошедших периодические поверки в «Ростест-Москва» в 2007 – 2013 гг., шт.

Год	Номер периодической поверки					
	I	II	III	IV	V	VI
2007	2	0	0	0	0	0
2008	19	1	0	0	0	0
2009	18	16	0	0	0	0
2010	14	15	14	0	0	0
2011	12	14	17	11	0	0
2012	7	17	11	18	10	0
2013	0	9	8	6	15	6

В таблице 2 приведены результаты 1-й периодической поверки. Указаны допускаемая в соответствии с описанием типа миллитесламетров погрешность измерений δ_0 в оцифрованных точках, а также количество приборов, фактическая погрешность измерений которых δ лежит в границах, указанных в таблице, в тех же точках поверки. Из двух показаний прибора при обеих полярностях измеряемого поля выбиралось показание, отягощенное большей погрешностью. Видно, что фактическая погрешность измерений δ миллитесламетров существенно ниже допускаемой δ_0 , заметно преобладают приборы с значениями $\delta < 1,5\%$. Следует иметь в виду, что наибольший вклад в суммарную погрешность измерений вносят погрешность, обусловленная нелинейностью ПХ, и погрешность градуировки миллитесламетра, при которой в том числе решается задача минимизации погрешности нелинейности.

Таблица 2. Распределение приборов, шт., по значениям погрешности измерений δ , %, (результаты 1-й периодической поверки)

Магнитная индукция В, мТл	Допуск. погр. δ_0 , %	Количество приборов				
		$\delta \geq 2,0$	$1,5 \leq \delta < 2,0$	$1,0 \leq \delta < 1,5$	$0,5 \leq \delta < 1,0$	$\delta < 0,5$
30	2,57	0	1	5	17	50
50	2,30	0	0	3	18	52
80	2,15	0	0	0	19	54
120	2,07	0	0	2	20	51
150	2,03	0	0	2	25	46
190	2,00	0	0	2	21	50
200	2,90	0	9	30	32	2
500	2,30	0	0	8	22	43
700	2,19	0	0	9	26	36
1200	2,07	0	1	14	44	14
1600	2,03	0	4	30	35	4

Интерес с точки зрения оценки возможности использования миллитесламетров ТПУ в качестве рабочих эталонов представляет табл. 3. В ней указаны допускаемая погрешность измерений δ_0 , %, в оцифрованных точках, а также количество приборов, погрешность измерений δ , %, которых, определенная при всех периодических поверках данного экземпляра прибора, лежит в границах, указанных в таблице, для этих точек поверки. Тут также из двух показаний прибора при обеих полярностях измеряемой магнитной индукции выбиралось показание, отягощенное большей погрешностью. Таблица характеризует именно стабильность показаний миллитесламетров ТПУ, т.е. стабильность воспроизведения магнитной индукции по результатам измерений этим прибором при использовании его в качестве эталона. Из сопоставления табл. 1, 2 и 3 видно, что погрешности, установленные при первичных поверках, за время эксплуатации приборов не претерпевают существенных изменений. Погрешности из-

мерений всех приборов по результатам первичной и периодических поверок, т.е. приписанные прибору при выпуске из производства и при его многолетней эксплуатации, не превышают 1,5 % (а большей части миллитесламетров в полях до 1,5 Тл – 1,0 %), сохраняя при этом, что очень важно, свои знаки.

Таблица 3. Распределение приборов, шт., по значениям погрешности измерений δ , % (по результатам периодических поверок)

Магнитная индукция В, мТл	Допускаемая погрешность δ_0 , %	Количество приборов, погрешность измерений δ , %, которых по результатам всех периодических поверок составляет		
		$1,0 \leq \delta < 1,5$	$0,5 \leq \delta < 1,0$	$\delta < 0,5$
30	2,57	2	39	32
50	2,30	2	24	47
80	2,15	2	23	48
120	2,07	1	21	51
150	2,03	2	20	51
190	2,00	1	20	52
200	2,90	7	37	29
500	2,30	3	31	39
700	2,19	2	36	35
1200	2,07	11	51	11
1600	2,03	24	44	5

Анализируя результаты периодических поверок, следует иметь в виду, что в процессе эксплуатации миллитесламетров их измерительные зонды могли подвергаться механическим и климатическим воздействиям, которые исключены для рабочих эталонов по условиям их применения. Установлено, например, что значительное механическое воздействие на измерительный ПХ типа ИМ104А-1, даже не приводя к его разрушению, может вызвать заметное необратимое изменение остаточного напряжения. Это может проявиться в смещении нулевого сигнала прибора за допустимые пределы. Правильная эксплуатация миллитесламетра ТПУ в соответствии с правилами содержания и применения рабочего эталона будет способствовать большей стабильности его метрологических характеристик.

Следует также иметь в виду, что в большом массиве данных, накопленных за значительный промежуток времени, неизбежно могут оказаться результаты измерений, отягощенные субъективной погрешностью.

Таким образом, можно сделать вывод, что по своим метрологическим характеристикам миллитесламетры ТПУ при измерениях постоянных магнитных полей отвечают требованиям, которые стандарт [1] предъявляет к рабочим эталонам 2-го разряда единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от 0,02 до 2 Тл.

При этом, конечно, надо учитывать то существенное обстоятельство, что правильный отсчет миллитесламетром может быть сделан только тогда, когда вектор измеряемой магнитной индукции перпендикулярен плоскости ПХ. При угле между магниточувствительной осью ПХ и вектором магнитной индукции, не превышающем 4° , погрешность миллитесламетра, обусловленная неверной ориентацией зонда, лежит в пределах 0,25 %. При дальнейшем увеличении этого угла погрешность быстро возрастает.

Для аттестации в качестве рабочих эталонов 2-го разряда единицы магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от 0,02 до 2 Тл по ГОСТ 8.030-2013 рекомендуются миллитесламетры ТПУ, ТПУ-03 или ТПУ-05. При этом представляется целесообразным, чтобы первич-

ную и периодические поверки миллитесламетров, предназначенных для аттестации в качестве указанных эталонов, проводил «Ростест-Москва» как обладающий на сегодня наилучшим метрологическим оборудованием для этих задач. Пользователь миллитесламетра проводит в соответствии с установленным порядком аттестацию эталона, указывая в его паспорте значения магнитной индукции, воспроизводимые эталоном, из протокола первичной поверки с учетом поправок, которые вводят в показания миллитесламетра в оцифрованных точках (точках поверки). Погрешность воспроизведения единицы в этих точках определяется нестабильностью миллитесламетра (погрешность передачи единицы при использовании установки УПТ-2 ФБУ «Ростест-Москва» имеет существенно меньшие значения). Для 1-го межаттестационного интервала рабочего эталона она может быть принята равной 1 % и в дальнейшем снижена по результатам периодических поверок.

Следует отметить, что к настоящему времени (декабрь 2017 г.) выпущено более 1400 единиц миллитесламетров ТПУ различных исполнений. Их первичную поверку с конца 2013 г. проводит изготовитель – ООО «Завод электронной техники», периодические поверки (калибровки) проводят ООО «ЗЭТ» и другие аккредитованные юридические лица. Понятно, что периодическим поверкам подвергается только часть изготовленных приборов, их суммарное количество неизвестно. Например, в ООО «ЗЭТ» на периодические поверки поступило в течение 2017 г. около 80 единиц миллитесламетров. Имеют место случаи выхода из строя измерительных зондов по причине их неправильной эксплуатации (2 единицы в 2017 г.), но изготовителю не известны случаи забракования миллитесламетров из-за их метрологической неисправности.

Литература

- 1. ГОСТ 8.030-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.*
- 2. ГСИ. МИ 2185-92. ГСИ. Тесламетры постоянного магнитного поля. Методика поверки.*
- 3. Гусев В.И., Казанцев Ю.И., Константинов К.С., Рыпалев С.В. Исследования серийных преобразователей Холла типа ПХЭ//Тез. докл. 6-й Всесоюзной конф. по проблемам магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры.–Л., 1983.*
- 4. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.*