

Воспроизведение и измерение постоянного тока в аттоамперном диапазоне с наивысшей точностью

О. М. ПАВЛОВ*, П. А. ЧЕРНЯЕВ**

* Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: o.m.pavlov@vniim.ru

** Белорусский государственный институт метрологии

Рассмотрены вопросы измерения и воспроизведения с наивысшей точностью постоянных токов в аттоамперном диапазоне. Приведены результаты длительных измерений значений электрометра В7-45 при отсутствии полезного сигнала и воспроизводимых значений сверхмалых постоянных токов. Описано устройство, основанное на применении метода измерения и воспроизведения сверхмалых токов путем счета электронов, которое может быть использовано в качестве первичного эталона в аттоамперном диапазоне.

Ключевые слова: электрометрический измеритель, калибратор, малые постоянные токи, эталон.

The problems of measurement and reproduction of ultra low DC currents in attoampere range have been considered. The results of long-term measurements of «zero» values of electrometer B7-45 and of reproducible values of ultra low DC currents are presented. A device based on application of the measurement method and reproduction of ultra low currents by electrons counting, which can be used as a primary standard in the attoampere range — is described.

Key words: electrometric instrument, calibrator of low DC currents, standard.

Измерители малых постоянных токов ($1 \cdot 10^{-15}$ А) получили широкое распространение во многих областях техники, особенно в дозиметрии ионизирующих излучений. Полученные значения силы тока в аттоамперном диапазоне 1 аА — 1 фА приводят как оценку высокой чувствительности электрометра, обычно с примером записи измерения тока 10 аА [1, 2]. Однако практическое использование электрометрических измерителей в этом диапазоне не получило большого прикладного распространения из-за многих особенностей такой аппаратуры.

Наиболее крупным изготовителем электрометрических приборов является фирма Keithley (США). В ее каталогах рекламируют такие модели, как 642 и 6430, а также 4200—SCS (система измерения параметров полупроводниковых приборов) с порогом чувствительности (реагирования) по току 10 аА.

Минским научно-исследовательским приборостроительным институтом (МНИПИ) были разработаны электрометры типа В7-29, В7-45 с повышенным порогом чувствительности 1 аА и ряд электрометров с порогом чувствительности порядка 1 фА. Для организации их промышленного выпуска создали оригинальные калибраторы токов ЕК1-6 и НК4-1 с диапазоном воспроизведения 10 аА — 1 мА. Эти калибраторы были сделаны на основе научно-исследовательских работ лаборатории электрометрических приборов ВНИИФТРИ для поверки измерителей малых токов и измерителей больших сопротивлений [3, 4]. Наибольшее применение они получили при поверке измерителей тока. Работа по созданию калибраторов проходила при активном участии сотрудников ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

Калибраторы ЕК1-6, НК4-1 и высокочувствительный электрометрический измеритель В7-45 позволили осуществить в Белорусском государственном институте метрологии калибровку и поверку всех типов имеющихся в стране измерителей малых токов и провести экспериментальные исследова-

ния по проведению достоверных измерений в аттоамперном диапазоне.

Разработка электрометрических измерителей и калибраторов малых токов проходила с учетом особенностей их применения. Известно, что входные цепи электрометров имеют высокое сопротивление изоляции и выполняются с использованием таких изоляционных материалов, которые вносят минимальные дополнительные помехи [4—6]. Поэтому в процессе калибровки вопросам соединения выходной цепи калибратора с входной цепью измерителя уделено большое значение. Входная цепь электрометра В7-45 выполнена на основе резонансного динамического конденсатора. Выходной цепью калибраторов силы тока является RC-цепь (соединенные последовательно для обеспечения некоторой постоянной времени резистор R и дифференцирующий конденсатор емкостью C_d). В рассматриваемом диапазоне токов емкость конденсатора выбирается порядка 1 пФ.

Воспроизводимый калибратором ток I_b определяется выражением [4, 5, 7]:

$$I_b = dQ/dt = d(C_d U)/dt = C_d dU/dt = C_d S, \quad (1)$$

где S — крутизна линейно изменяющегося напряжения U и заряда Q во времени t .

Значение S при токе 10 аА составляет 10 мкВ/с, при 100 аА — 100 мкВ/с, при 1 фА — 1 мВ/с. Измерение с высокой точностью таких малых значений крутизны — достаточно сложная задача. Измерение больших значений S с высокой точностью на практике осуществляется с помощью вольтметра 3458А (в диапазонах ± 1 и ± 10 В) с использованием команды SWEEP 100 (режим многократных измерений) [5, 8]. Для получения вышеуказанных значений S авторы также использовали вольтметр 3458А (в диапазоне ± 100 мВ) с его предварительной калибровкой в соответствии с рекомендациями фирмы Hewlett Packard [9].

Результаты измерений крутизны S со значением, близким к 10 мкВ/с в режиме возрастания напряжения при положительной полярности тока, приведены на рис. 1.

Среднее значение S по результатам измерений при снижении напряжения от +10 мВ до -10 мВ составляет 9,23434 мкВ/с (с отклонением от среднего не более 10 нВ), а при возрастании напряжения от -10 мВ до +10 мВ получаем $S = 9,23384$ мкВ/с (с отклонением от среднего не более 7 нВ). Разность между средними значениями S по двум полярностям составляет около 0,5 нВ/с. Полученные результаты свидетельствуют, что погрешность измерений S на самом чувствительном диапазоне, равном 100 аА, с учетом погрешности вольтметра, не превышает 1,5 % и для столь малых значений силы тока вполне приемлемы.

Измерение емкости дифференцирующего конденсатора проводили с помощью измерителя МНС-1100, входящего в состав Белорусского национального эталона единицы электрической емкости. Погрешность измерения емкости 1 пФ составила 0,84 %.

Другие составляющие погрешности воспроизведения тока обусловлены влиянием изоляторов, примененных в выходной цепи калибратора, и существующего радиоактивного фона излучения в окружающем пространстве. Оценка последней составляющей является достаточно сложным процессом, и ее выполнение совмещается с оценкой погрешности измерителя В7-45.

Для обеспечения высокого сопротивления изоляции (более 10^{16} Ом) дифференцирующий конденсатор выполнен с воздушным зазором между электродами (пластинами) и опорными изоляторами из лейкосапфира, имеющего минимальный собственный ток менее 10 аА [1, 5, 6, 8]. Корпус конденсатора сделан из металла, создает экранирование от внешних электрических полей и защищает от пыли и влаги. Выходной контакт конденсатора подвижен с целью непосредственного соединения с входом электрометра. Второй (корпусной) контакт выходной цепи дифференциатора имеет резьбу для соединения с корпусными контактами некоторых электрометров с помощью накидной гайки. Соединение дифференцирующей цепи калибратора НК4-1 с входным блоком электрометра В7-45 осуществляется «ловителем» — без применения соединительного кабеля.

Соединение блоков без использования кабелей с дополнительными клеммами значительно снижает паразитные входные токи. При соединении высокочувствительных узлов, какими являются рассматриваемые блоки, важно стабилизировать электрические потенциалы и температуру контактных устройств. Иногда для этого требуется значительное время. Учитывая малую крутизну S линейно изменяющегося напряжения, использование «ловителя» (из латуни) защищает от воздействия внешних электрических полей и обеспечивает механическую устойчивость системы.

Для снижения влияния естественного фона ионизирующего излучения входной блок электрометра и выходной блок калибратора выполнены минимально возможных размеров. В ионизационной камере с воздухоэквивалентными стенками, заполненной воздухом, в результате радиоактивного излучения создается ток ионов, рассчитываемый как [10]:

$$I_{\text{и}} = 3,3 \cdot 10^{-10} PV, \quad (2)$$

где P — мощность дозы ионизирующего излучения; V — объем камеры.

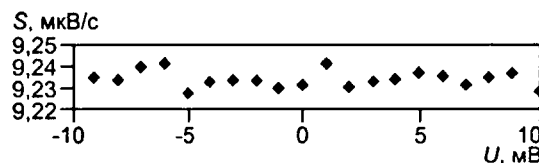


Рис. 1. Результаты измерения крутизны S напряжения при воспроизведении тока 10 аА

В данном случае выражение (2) можно использовать только для оценки возникающего ионизационного тока внутри электрометрической части (входа) электрометра.

Стенки узлов цепи дифференциатора и электрометра выполнены из металла, сечение взаимодействия излучения с которым значительно больше, чем с воздухоэквивалентными материалами. В [11] приведены данные, что в камере объемом $V = 1000 \text{ см}^3$ из-за естественного радиоактивного излучения (его мощность около 11 мкР/ч) создается ионизационный ток $I_{\text{и}} \approx 1 \text{ аА}$. Выбросы тока за счет альфа-частиц из узлов пайки могут быть значительно больше. Оцениваемый активный воздушный объем анализируемых узлов составляет около 5 см^3 . С учетом малой мощности излучения перемещение тока ионов будет полным и при малом уровне поля. Тогда ожидаемый ток, измеренный электрометром, может достигать 0,5 аА и более. Полярность поля можно определить экспериментальным путем, подавая на вход электрометра эталонные значения тока положительной и отрицательной полярностей.

Для более достоверной оценки влияния фоновой ионизационной составляющей измеряемого тока принято решение воспроизвести токи 10, 20, 50 и 80 аА, т. е. по всему самому чувствительному диапазону $\pm 100 \text{ аА}$, по двум полярностям. Предварительные измерения продолжительностью в несколько дней показали, что во всех приведенных точках положительной полярности наблюдается завышение значений, а при отрицательных значениях тока — занижение значений силы тока, симметричное по величине. В разные дни средние значения отклонений изменялись на $\pm 3 \text{ аА}$. Для лучшей стабилизации результатов измерений соединяемые блоки не разъединяли несколько дней — при таком соединении более тщательно выравниваются электрические потенциалы стыкуемых узлов. После включения устанавливали значения выходного тока калибратора 10 аА в режим «Сброс» или «Стоп», а электрометра после прогрева в течение 45 мин — на диапазон $\pm 1 \text{ фА}$ (единица младшего разряда этого диапазона равна 1 аА). После калибровки электрометр переходил в режим измерения тока. В режиме «Стоп» в калибраторе не вырабатывается линейно изменяющееся напряжение (как и в режиме «Сброс»), и в этом состоянии проводили длительные измерения тока, регистрируемые прибором В7-45 (значения при отсутствии полезного сигнала). После нажатия кнопки «Пуск» калибратор переходил в режим воспроизведения тока 10 аА (полярность «плюс»), а после ряда измерений (отсчетов по электрометру) последовательным нажатием кнопок «Стоп» — (полярность «минус») — «Пуск» приборы переводили в режим воспроизведения и измерения тока 10 аА. Аналогично воспроизводили и измеряли по двум полярностям токи 20, 50, 80, 100, 200, 500, 800 и 1000 аА.

Все измерения выполняли при температуре 22°C в экранированном от внешних электромагнитных полей помещении, расположенном на глубине около 6 м от поверхнос-

Таблица 1

Измеренные значения силы тока

Воспроизводимое значение тока, аА	Измеренное значение тока, аА при соответствующей погрешности нулевого значения за счет фонового ионизирующего излучения, аА											
	02	02	03	03	03	02	02	02	03	03	02	03
+10	12	10	11	12	12	13	13	12	11	12	12	12
-10	-07	-08	-07	-06	-06	-07	-07	-06	-06	-07	-06	-06
-20	-15	-16	-16	-16	-16	-15	-16	-15	-15	-16	-16	-15
+20	22	21	22	22	22	21	22	23	22	22	23	25
+50	52	50	55	54	53	53	52	52	52	52	52	51
-50	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-47	-46	-47	-47
-80	-79	-79	-77	-77	-77	-77	-77	-77	-77	-76	-75	-76
+80	84	85	85	84	84	84	83	82	83	83	82	82

Представленные в табл. 1 результаты измерений воспроизводимых постоянных токов в аттоамперном диапазоне свидетельствуют о возможности их измерений с отклонением одиночных показаний до ± 3 аА во всем диапазоне 10—1000 аА.

На рис. 2 показаны результаты длительных измерений воспроизводимых значений токов без учета их смещения из-за воздействия фонового ионизирующего излучения. Основная причина наблюдаемых флуктуаций результатов

ти земли. В табл. 1 приведены некоторые измеренные прибором В7-45 значения тока.

Наблюдается завышение показаний во всех точках примерно на 1—5 аА при воспроизведении тока положительной полярности и занижение на такое же значение при токе отрицательной полярности.

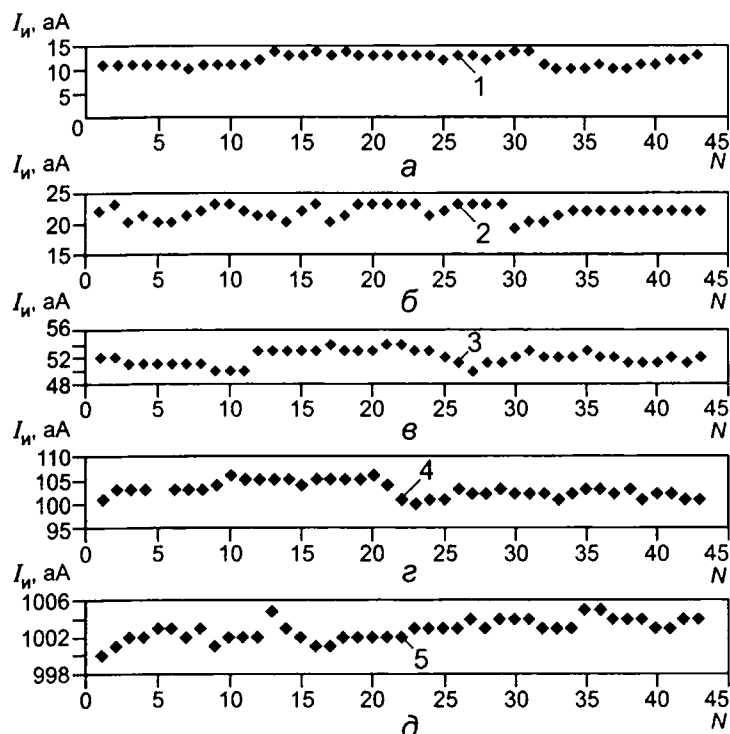


Рис. 2. Результаты длительных измерений:

а — тока I_0 электрометра В7-45 за счет фонового ионизирующего излучения; б — е — воспроизводимых сил тока электрометром В7-45, соответственно $I_b = +10, +20, +50, +100, +1000$ аА; N — отсчеты

связана с влиянием на входную часть электрометра естественного радиоактивного фона окружающей среды и используемых конструктивных материалов, в том числе припоев для соединения электрических цепей. Измерение весьма малых значений силы тока — очень сложный процесс и требует многократного повторения процедуры. Для ее выполнения необходимы стабильные температурные условия. Переходные процессы при любых переключениях в электрических цепях достаточно длительны и составляют сотни секунд. Предлагаемый метод измерений на практике может быть полезен, например, при необходимости уменьшения размеров ионизационной камеры в дозиметрии фотонного излучения и выборе материалов для полупроводниковых приборов, а также при проведении электрофизиологических измерений с уровнями сигналов по напряжению 10—150 мкВ [12]. Калибратор тока с приведенными в этой статье возможностями позволяет более детально исследовать электрометрические приборы с предельными значениями характеристик.

В настоящее время в РФ в качестве первичного эталона единицы силы тока используется ГЭТ 4—91. Расширенная неопределенность воспроизведения электрометрической частью эталона в диапазоне 100 аА — 1 пА составляет $5 \cdot 10^{-2} — 1 \cdot 10^{-3}$ [13].

Во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработано устройство, основанное на методе измерения и воспроизведения сверхмалых постоянных токов путем счета электронов электронным умножителем, которое может быть использовано в качестве первичного эталона в аттоамперном диапазоне [14].

В 2007 г. Консультативный комитет по электричеству и магнетизму (ККЭМ) предложил странам внести изменения в Международную систему единиц (СИ), в частности, рекомендовал к использованию новое определение ампера: «ампер — это электрический ток эквивалентного потока, точно равный $1/1,60217653 \cdot 10^{-19}$ элементарных зарядов в секунду». Из этого следует, что определение фиксирует элементарный заряд как равный точно $1,6021765310^{-19}$ А·с [15].

В масс-спектропии для определения состава вещества применяют метод счета заряженных частиц посредством

устройств, содержащих фотоэлектронный или каналный электронный умножитель. Этот же принцип можно использовать для счета электронов, что позволит измерять токи в диапазоне 1 аА — 1 пА ($1 \cdot 10^{-12}$ А). Здесь ток измеряют через заряд электрона и частоту, опираясь на определение физического смысла единицы силы тока: «1 А — это сила тока, при котором через поперечное сечение проводника за 1 с проходит заряд в 1 Кл». При этом частота импульсов f (количество электронов) на выходе электронного умножителя определяет количество электронов в измеряемой цепи:

$$i = ef, \quad (3)$$

где $e = 1,602\,176\,53 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Блок-схема устройства для измерения и воспроизведения силы постоянного тока, позволяющего реализовать метод счета электронов, изображена на рис. 3. Счет электронов осуществляет электронный умножитель с коэффициентом усиления порядка 10^8 , его темновой ток не превышает 1 е/с. Поскольку амплитуда импульса не входит в основное уравнение измерения, стабильность коэффициента усиления умножителя не влияет на полученный результат.

В режиме измерения силы тока устройство работает следующим образом: аттестуемый рабочий эталон (калибратор) 2 поставляет ток, который протекает между катодом 7 и контрольным электродом 8. При этом напряжение между катодом и электродом устанавливается автоматически источником измеряемого тока и оно остается постоянным, так как не зависит от внешней нагрузки. Таким образом, эмиссия катода является пропорциональной измеряемому току.

Постоянный ток, обеспечиваемый катодом, проходит через контрольный электрод и питает электронный умножитель 10. При этом каждый электрон дает импульс, выделяемый на сопротивлении нагрузки электронного умножителя. Затем он поступает на счетчик импульсов 12. При использовании позолоченного катода необходим источник ультрафиолетового излучения 1 для обеспечения работы устройства в заданном интервале токов.

Воспроизведение постоянного электрического тока осуществляют по формуле (1). Линейно изменяющееся напряжение, прикладываемое к входному (среднему) электроду, заряжает емкости 4, 5, а скорость изменения напряжения dU/dt пропорциональна воспроизводимому току. При $C_{в1} = C_{в2}$ (см. рис. 3) воспроизводимые токи будут равны: $i_1 = i_2$.

В устройстве ток i_1 или ток i_3 , воспроизводимый аттестуемыми эталонами или калибраторами тока, измеряют описанным выше способом в реальном времени, а ток i_2 используют для аттестации эталонных средств измерений (например электрометров) или для других целей.

Количество импульсов, пропорциональное силе измеряемого тока, может быть измерено частотомером с неопределенностью не более $1 \cdot 10^{-7}$. Заряд электрона e известен с неопределенностью $4 \cdot 10^{-8}$. Следовательно, неопределенность измерения и воспроизведения силы тока, в основном, определяется другими источниками (табл. 2).

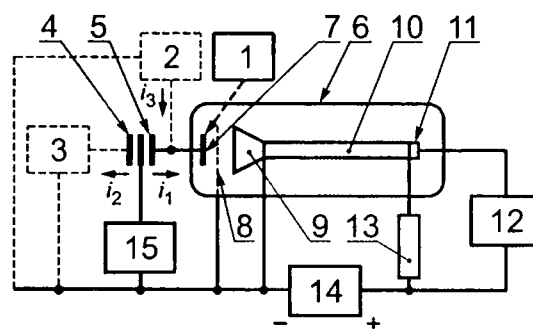


Рис. 3. Блок-схема устройства для измерения и воспроизведения постоянного тока:

1 — источник ультрафиолетового облучения; 2 — аттестуемый эталон (калибратор) тока; 3 — аттестуемое эталонное средство измерения тока; 4, 5 — конденсаторы $C_{в2}$ и $C_{в1}$; 6 — вакуумный баллон; 7 — катод эмитирующий электроны; 8 — контрольная сетка; 9 — катод электронного умножителя; 10 — электронный умножитель; 11 — анод электронного умножителя; 12 — счетчик импульсов; 13 — сопротивление нагрузки; 14 — источник питания электронного умножителя; 15 — мера линейно изменяющегося напряжения

Таблица 2

Бюджет неопределенностей устройства

Источник неопределенности	Значение неопределенности	Диапазон измеряемых токов
Заряд электрона	$4 \cdot 10^{-8}$	1 аА — 1 пА
Измерение частоты	$1 \cdot 10^{-7}$	
Нестабильность темнового тока электронного умножителя	$2 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-7}$	(1 — 10) аА 100 аА — 1 фА (10 — 100) фА 1 пА
Ток утечки	$2 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-7}$	(1 — 10) аА 100 аА — 1 фА (10 — 100) фА 1 пА
Дробовый шум, в полосе 0,01 Гц	$(2-6) \cdot 10^{-2}$ $(2-6) \cdot 10^{-3}$ $(2-6) \cdot 10^{-4}$ $6 \cdot 10^{-5}$	(1 — 10) аА 100 аА — 1 фА (10 — 100) фА 1 пА

Флуктуации ионизационного тока и неточность определения емкостей учитывают при обработке результатов измерений путем исключения, если это необходимо, явных выбросов и перестановки местами конденсаторов $C_{в2}$, $C_{в1}$.

Бюджет неопределенностей показывает, что устройство, основанное на электронном умножителе, при соблюдении приведенных выше рекомендаций позволит как расширить диапазон измерения и воспроизведения силы тока в сторону меньших значений до ± 1 аА, так и повысить их точность, обеспечив этим возможность создания первичного эталона одной из основных единиц СИ — единицы силы постоянного электрического тока (ампера) в области его дольных значений.

Литература

1. Nie A. G. Измерение токов ниже $1 \cdot 10^{-17}$ А при низком уровне шумов с помощью динамического емкостного электрометра // IEEE Intern. Conv. Record. 1967. V. 15. P. 59—65.
2. Илюкович А. М., Носенко В. А., Черняев П. А. К вопросу о мерах для поверки электрометрических измерителей предельной чувствительности // Сб. «Техника средств связи». Сер. «Радиоизмерительная техника». 1979. № 5(13). С. 20—24.
3. Борзов В. М., Илюкович А. М. Аппаратура для поверки электрометрических измерителей токов в диапазоне 10^{-8} — 10^{-17} А. М.: Труды ВНИИФТРИ. 1973. № 10(40). С. 90—103.
4. Илюкович А. М. Техника электрометрии. М.: Энергия, 1976.
5. Черняев П. А., Казакова Е. А. Особенности аппаратуры для измерений сигналов в высокоомных цепях // Метрология и приборостроение. 2011. № 2. С. 35—39.
6. Силл и Ен. Прибор для измерения сопротивлений изоляторов // Приборы для научных исследований. 1968. Т. 41. № 3. С. 116—117.
7. Павлов О. М., Покусаев А. В., Телитченко Г. П. Эталонная база России в области измерений малых постоянных токов в диапазоне 10^{-16} — 10^{-9} А // Измерительная техника. 2007. № 11. С. 40—42; Pavlov O. M., Pokusaev A. V., Telitchenko G. P. The standard base of Russia for measuring small direct current in the 10^{-16} — 10^{-9} a range // Measurement Techniques. 2007. V. 50. N. 11. P. 1185—1188.
8. Лобко В. П. и др. Исследование эталонного оборудования воспроизведения малых постоянных токов // Метрология и приборостроение. 2013. № 2. С. 40—42.
9. Hewlett-Packard Company. HP 3458A Multimeter. Operating, Programming and Configuration. Manual, 1994. [Официальный сайт] <http://www.hp.com/ru> (дата обращения 23.02.2014 г.).
10. Иванов В. И. Курс дозиметрии. М.: Атомиздат, 1970.
11. Носенко В. А., Фролова А. В., Черняев П. А. Флуктуации при измерениях приборами с ионизационными камерами // Медицинская радиология. 1975. № 2. С. 54—61.
12. Советов А. Н. Восстановительные и компенсаторные процессы в центральной нервной системе. М.: Медицина, 1988.
13. Katkov A. S. et al. Primary Standard of Current Developed of VNIIM. 2nd ISEM, China. 1993. P. 47—48.
14. Пат. № 2478974 РФ. Способ воспроизведения единицы силы постоянного электрического тока и устройство для его осуществления / Александров В. С., Павлов О. М., Телитченко Г. П. / Изобретения. Полезные модели. 2013. № 10.
15. RECOMMENDATION E 1 (2007): Proposed changes to the International System of Units (SI) // CCEM. 2007-44.

Дата принятия 15.04.2014 г.

531.746

Инклинометрическая система для подземной пространственной ориентации

А. И. ЗАЙКО, Г. А. ИВАНОВА

Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия, e-mail: zaiko@ugatu.ac.ru

Рассмотрен алгоритм принятия решения для инклинометрической системы со структурной избыточностью, позволяющий сделать вывод о достоверности измерений на базе показаний магнитометрического или гироскопического модулей. В качестве критериев выбора достоверного измерения предложено использовать информацию о существовании магнитных возмущений, сигналы с первичных датчиков и привязку к широте местности.

Ключевые слова: инклинометрическая система, подземная навигационная система, структурная избыточность.

A decision making algorithm for inclinometric system with structural redundancy allowing to make a conclusion on validity of measurements based on readings of magnetometric or gyroscopic modules has been considered. The information on magnetic disturbances, signals from primary sensors, and location latitude data was suggested as a criterion for adequate measurement selection.

Key words: inclinometer system, underground navigation system, structural redundancy.

Задача пространственной ориентации нефтегазовых скважин при бурении и обслуживании решается с помощью инклинометрического измерительного комплекса. В его состав входит скважинный модуль и наземное устройство, обмен информацией между которыми осуществляется по каналу связи. По типу используемых первичных датчиков инклинометры делятся на магнитометрические и гироскопические [1, 2].

Современные магнитометрические инклинометры получили широкое распространение из-за высокой вибро- и ударостойкости, приемлемой стоимости и возможности работы в широком диапазоне температур, однако точность инклинометрической системы (ИС) на базе феррозондов зависит от существования намагниченных масс. Область применения магнитометрических инклинометров ограничена невозможностью проведения измерений в скважинах, обса-