

О СПОСОБАХ КОРРЕКЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ГРАВИМЕТРА С НЕЛИНЕЙНОЙ ФУНКЦИЕЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Проведена оценка погрешностей выходного сигнала гравиметра, обусловленной смещением отсчета и изменением нелинейной функции преобразования прибора. Предложены способы устранения этих погрешностей. Приведены экспериментальные данные, позволяющие оценить уровень погрешности, обусловленной искажением функции преобразования из-за изменения температуры окружающей среды.

Введение

В «ЦНИИ Электроприбор» разрабатываются относительные гиросtabilизированные гравиметры с двойной упругой кварцевой системой, представляющей собой два идентичных горизонтальных маятника, подвешенные на тонких кварцевых нитях [1–4]. При изготовлении прибора для выставки маятников в горизонтальное положение кварцевые нити закручиваются на угол около 200° . В приборе не используются обратные связи для возвращения маятников в нулевое положение при воздействии переменных ускорений. Кварцевая система расположена в вязкой жидкости, обеспечивающей возможность работы в небольшом (несколько градусов) диапазоне отклонения маятников при измерении статического или медленно изменяющегося ускорения в пределах 10 Гал и наличии высокочастотных возмущений объекта до 100 Гал [5].

Отклонения маятников фиксируются оптико-электронным преобразователем (ОЭП). В совокупности с упругой кварцевой системой ОЭП осуществляет прямое физическое преобразование входного сигнала W в отсчеты m на выходе ОЭП, которое можно описать функцией прямого преобразования (ФПП). Выходной сигнал гравиметра получают после применения функции обратного преобразования (ФОП), обеспечивающей выражение отсчетов m в единицах входного сигнала W , который представляет собой сумму ускорения силы тяжести и вертикальной составляющей инерциального ускорения.

Для приборов такого типа характерно значительное смещение выходного отсчета на шкале ОЭП, именуемое суточным дрейфом и достигающее 2–3 мГал/сутки. Это смещение обусловлено в первую очередь деформациями в подвесе, связанными с эффектами ползучести [6]. На выходе прибора это смещение учитывается после проведения измерений на опорном гравиметрическом пункте (ОГП), для которого точно известно значение ускорения силы тяжести. В промежутках между измерениями на ОГП компенсация смещения отсчета осуществляется путем прогнозирования суточного дрейфа.

Обычно вычитание обнаруженного при измерениях на ОГП смещения выходного отсчета ОЭП и расчетного значения суточного дрейфа производится из выходного сигнала прибора, т.е. после применения ФОП. При этом считается,

Блажнов Борис Александрович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Джилавдари Игорь Захарович. Доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Белоруссия).

что при проведении относительных измерений это вычитание не приводит к дополнительной погрешности.

Гравиметрические датчики такого типа обладают малым уровнем собственных шумов, но нелинейной ФПП. Благодаря тщательной отладке конструкции и применению системы термостатирования получена высокая стабильность ФПП этих гравиметров. Однако, как показывает практика, с течением времени и под воздействием возмущающих факторов ФПП гравиметра может изменяться, поэтому ФОП подлежит регулярному уточнению, для чего проводится периодическое эталонирование прибора. В противном случае вследствие изменений ФПП вычитание смещения сигнала на выходе ФОП гравиметра может приводить к возникновению методических погрешностей измерений, дополнительных к его инструментальным погрешностям.

В данной работе рассматриваются изменения ФПП чувствительного элемента гравиметра (ЧЭГ), обусловленные смещениями отсчетов m на выходе ОЭП. При этом рассматриваются два типа таких смещений. Первый тип характерен тем, что изменение отсчета на выходе ОЭП происходит в точном соответствии с ФПП прибора, полученной при последнем эталонировании, и, следовательно, полностью эквивалентно появлению паразитного смещения во входном измеряемом сигнале. Этот тип смещения можно объяснить естественным наклоном маятников вследствие ослабления упругости подвеса. Показано, что вычитание смещения этого типа из выходного сигнала не приводит к дополнительной погрешности.

Смещение отсчета второго типа связано с аддитивной погрешностью ОЭП. В настоящей работе показано, что в этом случае обычное вычитание смещения из выходного сигнала гравиметра в силу нелинейности ФОП вызывает дополнительную погрешность, эквивалентную искажению линейного коэффициента ФОП. В качестве примера приведены результаты специального эксперимента, демонстрирующие искажение ФПП прибора, обусловленное изменением температуры окружающей среды. Устранить эту дополнительную погрешность можно путем корректировки ФОП.

Функции прямого и обратного преобразования ЧЭГ

Для пояснения механизма влияния на выходной сигнал ЧЭГ смещений отсчета на выходе ОЭП прибора различных типов получим сначала выражение для ФПП.

При проведении эталонирования гравиметра определяются параметры ФОП $F^{-1}(m)$ прибора, позволяющие выразить отсчетные значения m ОЭП в единицах ускорения силы тяжести W . С достаточной для практики погрешностью 0.01% нелинейная ФОП при эталонировании определяется методом наклона в виде полинома второго порядка

$$F^{-1}(m) = We + bm + am^2, \quad (1)$$

где $m = Mr - M0$ – разность между отсчетом Mr ОЭП при наклоне и некоторым значением $M0$, за которое обычно принимается середина шкалы ОЭП.

Параметры полинома (1) We , b и a рассчитываются методом наименьших квадратов по значениям отсчетов ОЭП для 9 значений наклона, при которых измеряются проекции ускорения силы тяжести на ось чувствительности гравиметра.

Процесс преобразования входного сигнала W , как показано на рис. 1, включает прямое преобразование $F(W)$, т.е. преобразование входного сигнала $W = W_r - W_e$ (W_r – входное ускорение при рабочих измерениях; W_e – ускорение, соответствующее отсчету M_0) к отсчету m на выходе ОЭП, и обратное преобразование $F^{-1}(W)$, переводящее отсчетные значения m в единицы выходного сигнала W_{out} .

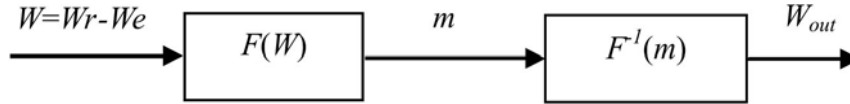


Рис. 1. Преобразование входного сигнала в гравиметре

Аналитическое выражение для ФПП, содержащее коэффициенты a и b ФОП, определенные при эталонировании с учетом необходимости соблюдения тождества $W_{out} = W$,

$$W_{out} = F^{-1}(m) = F^{-1}[F(W)] = W \quad (2)$$

можно получить, решая квадратное уравнение (1) относительно m и используя корень, при котором $m=0$, если $W=W_e$. Учитывая, что на опыте коэффициент $b>0$, из уравнения (1) имеем

$$F(W) = \frac{b}{2a} \left[\sqrt{1 + \frac{4a(W - W_e)}{b^2}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Анализ полученного выражения (3) показывает, что выбранный для аппроксимации ФОП полином второго порядка (1) обеспечивает компенсацию нелинейности ФПП (3), которая с относительной погрешностью 0.01% имеет вид полинома третьего порядка

$$F(W) \approx \frac{1}{b} W_e + \frac{1}{b} W - \frac{a}{b^3} W^2 + \frac{2a^2}{b^5} W^3.$$

Два типа смещения отсчета на выходе ОЭП

Как уже упоминалось, для ЧЭГ возможны два типа смещения отсчета m на выходе ОЭП, не обусловленные изменением входного сигнала W . На рис. 2 продемонстрировано различие влияния этих двух типов смещения на выходной сигнал ЧЭГ.

Смещение отсчета первого типа (рис. 2, а) обусловлено естественным остаточным наклоном маятников и происходит в точном соответствии с нелинейной ФПП (т.е. вдоль кривой 1, характеризующей ФПП прибора, полученной при первичном эталонировании). На плоскости Wm это может быть представлено как смещение ФПП вдоль оси m в положение, показанное кривой 3. Если при наличии смещения этого типа провести повторное эталонирование прибора, то в полученной ФОП изменится только значение свободного члена $W_e - \Delta W_n$ полинома (1), а коэффициенты a и b ФОП останутся неизменными, поэтому такое смещение эквивалентно появлению паразитного смещения ΔW_n во входном измеряемом сигнале. Полученная по формуле (3) ФПП также сместится вдоль оси W из положения (2) в положение (4). При этом одна и та же величина ΔW_n для

измерений на ОГП и в рабочей точке приводит к различным значениям смещения отсчетов m в ОЭП гравиметра (соответственно $Mo + \Delta Mo$ и $Mr + \Delta Mr$ на рис. 2, а), но после применения ФОП, полученной при первичном эталонировании, разностный выходной сигнал относительного гравиметра $Wr_{out} - Wo_{out}$ будет в точности соответствовать входному разностному сигналу $Wr - Wo$. Для получения абсолютного значения ускорения силы тяжести достаточно из выходного сигнала вычесть определенное на ОГП значение ΔWn в единицах ускорения силы тяжести.

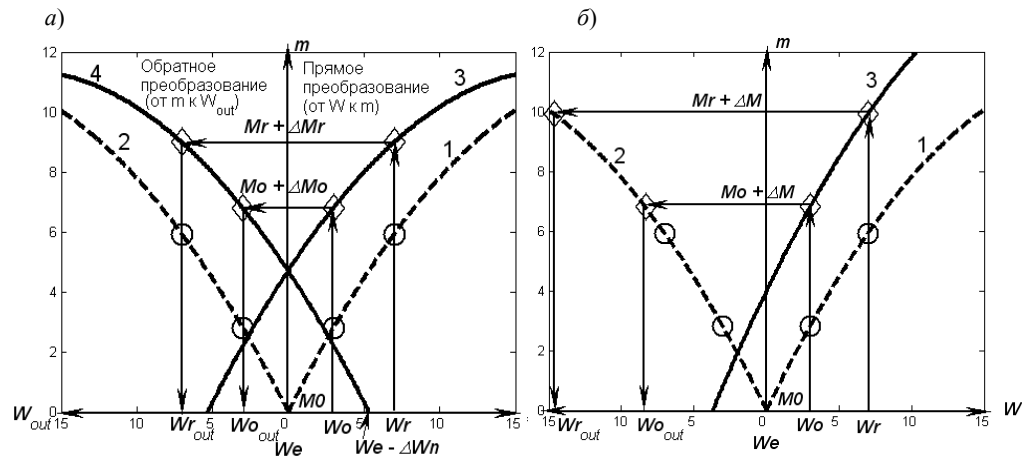


Рис. 2. Влияние различных типов смещения отсчета на выходной сигнал гравиметра при проведении относительных измерений:
а) смещение отсчета 1-го типа; б) смещение отсчета 2-го типа

Смещение отсчета второго типа (рис. 2, б), приводящее к смещению ФПП на величину ΔM на шкале ОЭП, эквивалентно изменению значения начального отсчета Mo ФПП (т.е. смещению кривой 1 на плоскости Wm вдоль оси m в положение 3). В этом случае фиксируемые в ОЭП новые отсчеты $Mo + \Delta M$ и $Mr + \Delta M$ попадают на другой участок ФОП, полученной при первичном эталонировании, имеющий соответственно другую кривизну. Применение ФОП, в которой смещение ΔM не учитывается, приводит к тому, что разность выходных сигналов $Wr_{out} - Wo_{out}$ в силу нарушения условия (2) и нелинейности ФОП уже не равна разности входных сигналов $Wr - Wo$. Следовательно, смещение отсчета ОЭП гравиметра, одинаковое для опорных и рабочих измерений, на выходе ЧЭГ дает различное изменение выходного сигнала (т.е. приводит к изменению масштабного коэффициента при проведении относительных измерений). В этом случае при проведении повторного эталонирования (без учета смещения ΔM) изменится и коэффициент b ФОП.

Ниже выведены аналитические выражения для погрешностей, обусловленных смещением отсчета второго типа.

Вывод выражений для погрешностей ЧЭГ, обусловленных смещением отсчета ОЭП

Схема измерения входного сигнала W , не учитывающая наличия смещения второго типа представлена на рис. 3. Здесь штриховой линией обозначены процессы, происходящие в гравиметре и приводящие к появлению в отсчетном устройстве прибора некоторого результирующего отсчета m' .

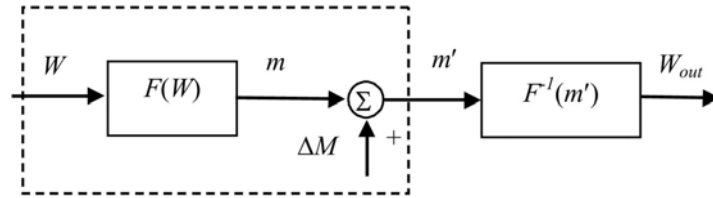


Рис. 3. Преобразование входного сигнала в гравиметре при наличии смещения второго типа

В силу нелинейности функции обратного преобразования (1) наличие смещения ΔM приведет к тому, что в выходном сигнале

$$W_{out} = W - We + \Delta W_{ад} + \Delta W_{мул} \quad (4)$$

появятся аддитивная $\Delta W_{ад} = b\Delta M + a(\Delta M)^2$ и мультипликативная $\Delta W_{мул} \approx 2\frac{a}{b}(W - We)\Delta M$ погрешности. Для полного устранения обеих составляющих погрешности (рис. 3 и выражение (4)) достаточно перед применением ФОП вычесть из отсчета ОЭП значение смещения ΔM .

Как уже отмечалось, стандартная процедура измерения относительным гравиметром проходит в два приема. Сначала проводятся измерения на ОГП и запоминается величина Wo_{out} , которая вычитается при проведении рабочих измерений из выходного сигнала Wr_{out} .

Реализованная в программном обеспечении прибора схема вычисления выходного сигнала гравиметра W_{out1} , соответствующего входному сигналу $(Wr - Wo)$, получаемому в ходе проведения рабочих измерений при наличии смещения ФПП только второго типа, представлена на рис. 4, где δM – дополнительное смещение ФПП, которое может иметь место в гравиметре за время, прошедшее между измерением на ОГП и рабочим измерением.

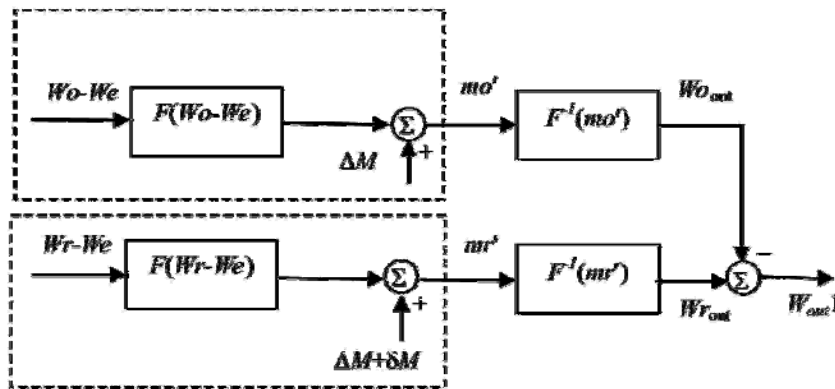


Рис. 4. Схема вычисления выходного сигнала гравиметра относительно ОГП

Расчет величины W_{out1} с помощью формул (1) и (3) при сохранении членов, линейных по параметру $a \ll 1$, и выполнении условия $\delta M \ll \Delta M$ дает следующее выражение:

$$W_{out1} = (Wr - Wo) \left(1 + 2\frac{a}{b}\Delta M \right) + b\delta M. \quad (5)$$

Из (5) видно, что при проведении относительных измерений вследствие нелинейности ФОП в выходном сигнале появляются мультипликативная погрешность, пропорциональная ΔM

$$\Delta W_{1\text{мул}} = 2 \frac{a}{b} \Delta M (Wr - Wo) \quad (6)$$

и аддитивная погрешность, пропорциональная только δM : $\Delta W_{1\text{ад}} = b\delta M$.

Возможна также схема измерений, в которой учитываются и компенсируются погрешности, обусловленные смещениями обоих типов (рис. 5).

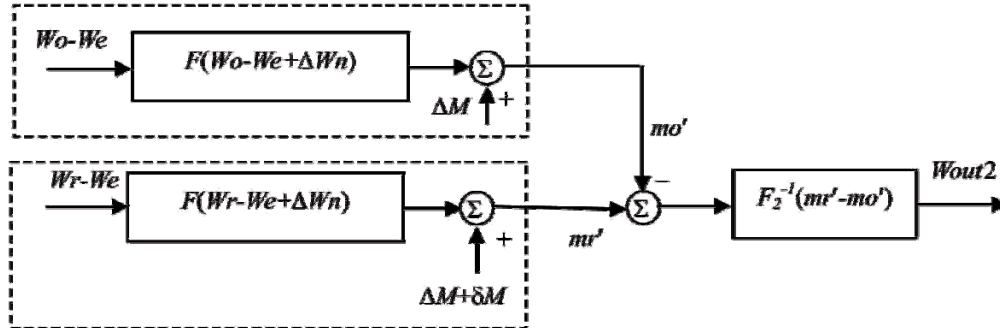


Рис. 5. Второй способ обработки выходного сигнала относительно ОГП

При обработке сигналов по схеме рис. 5 перед применением ФОП проводится прямое вычитание отсчета mo' из отсчета mr' . В этом случае смещение ΔM , образовавшееся к моменту проведения измерений на ОГП, вычитается автоматически, но при этом смещается начало отсчета ФПП. Сигнал на выходе гравиметра при использовании тех же приближений имеет вид

$$W_{out2} = (Wr - Wo) \left[1 - 2 \frac{a}{b^2} (Wo - We + \Delta Wn) + 2 \frac{a}{b} \delta M \right] + b\delta M. \quad (7)$$

При таком способе обработки имеют место мультипликативная и аддитивная погрешности:

$$\Delta W_{\text{мул}} = -2 \frac{a}{b^2} (Wr - Wo) (Wo - We + \Delta Wn - b\delta M); \quad (8)$$

$$\Delta W_{\text{ад}} = b\delta M.$$

Для обнаружения появившейся в процессе эксплуатации мультипликативной погрешности при выполнении рабочих измерений достаточно измерить заведомо известную разность двух входных сигналов. При проведении гравиметрической съемки для этой цели могут быть использованы измерения выходных сигналов при прохождении одной и той же точки полигона на встречных галсах. При съемке с самолета разность сигналов, обусловленная поправкой Этвеша, достигает 1500 мГал, современная спутниковая навигационная аппаратура позволяет рассчитать эту поправку с погрешностью $\sim 0.01\%$.

Дополнительная аддитивная погрешность $\Delta W_{\text{ад}} = b\delta M$ может быть устранена в том случае, если при проведении эталонирования прибора определена зависимость смещения от возмущающих факторов (например, от температуры), а при обработке результатов использована алгоритмическая компенсация этой зависимости.

Экспериментальное исследование влияния температуры на ФПП

Для получения количественной оценки возможных искажений ФПП прибора (смещений отсчета первого и второго типа) был поставлен специальный эксперимент с одним из ЧЭГ, общее смещение в котором относительно отсчета, принятого за нулевой, достигло 4900 мГал. Эксперимент заключался в том, что была проведена серия процедур (приемов) эталонирования методом наклона. Первая процедура была использована для расчета коэффициентов a и b ФОП. После 10-дневного перерыва было проведено еще 7 процедур уже без выключения питания прибора: две при нормальном значении температуры $\sim 23^\circ\text{C}$, две при задании в камере температуры 15°C , затем одна при температуре 28°C и в конце еще две при 23°C . Данные первой из этих 7 процедур использовались как опорные измерения при обработке результатов всех 8 в режиме относительных измерений.

Кварцевая система гравиметра находилась в термостате, обеспечивающем стабильность температуры в нем не хуже 0.1°C во время всего эксперимента. После каждого изменения температуры в камере до начала эталонирования осуществлялась выдержка при новом значении температуры не менее 4 часов. Эталонирование производилось в автоматическом режиме путем наклона ЧЭГ на трехосном стенде фирмы Acutronic модели AC3367TCN.

На графиках рис. 6 представлены зависимости погрешности коэффициента b ФОП от изменения температуры окружающей среды (a) и от температуры аддитивной погрешности (b), обусловленной использованием для всех 8 процедур ФОП, полученной при первом приеме эталонирования. При этом учитывалась линейная аппроксимация суточного дрейфа.

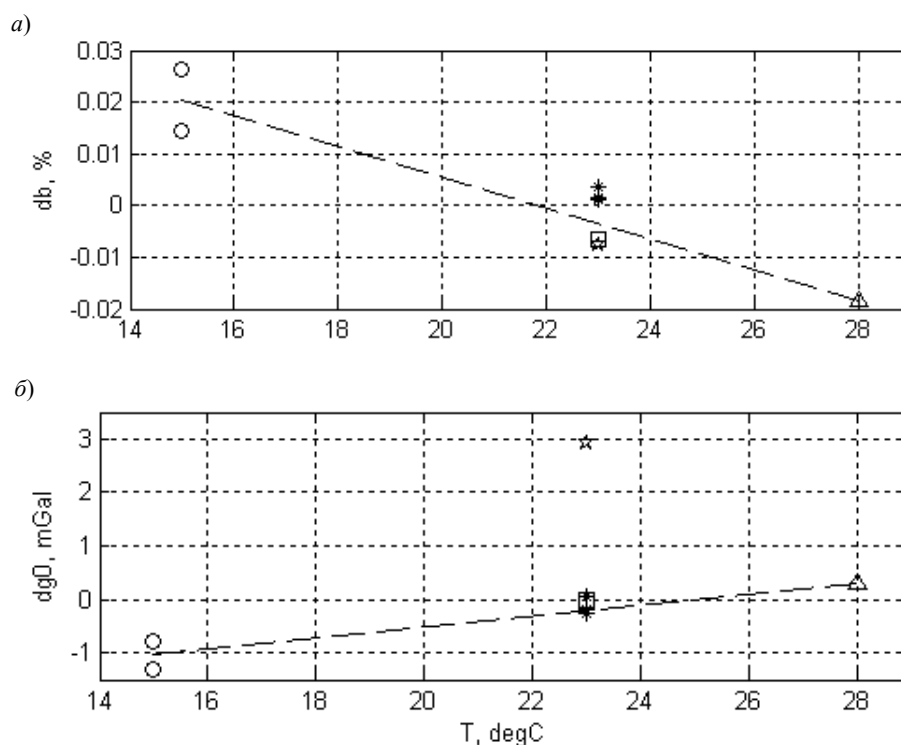


Рис. 6. Зависимость мультипликативной (db) и аддитивной ($dg0$) погрешностей от температуры

Как видно из рисунка, температурная зависимость мультипликативной погрешности составила ± 0.0015 мГал/о.е./°С, а аддитивной ± 0.1 мГал/°С. Кроме того, после отключения питания аддитивная погрешность составила 3 мГал за счет отклонения от суточного дрейфа.

На рис. 7 представлена разность между значениями выходных сигналов с применением ФОП с фиксированными параметрами a_1 и b_1 , полученными при первом эталонировании, и с применением ФОП, в которой для каждого эталонирования использовалось собственное значение коэффициента b_i . При таком способе обработки удастся в значительной степени уменьшить влияние случайных и систематических погрешностей эталонирования во всем диапазоне входных сигналов.

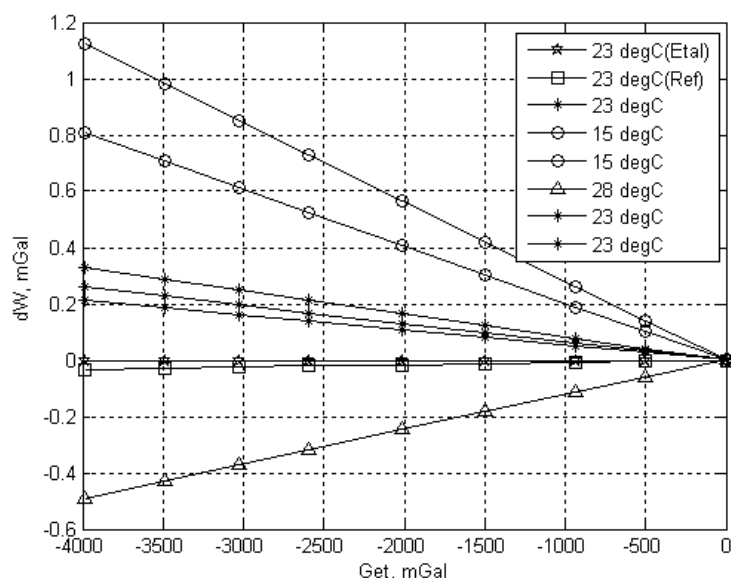


Рис. 7. Погрешность измерений, обусловленная искажениями ФПП ЧЭГ в ходе эксперимента

Все отклонения от линейного суточного дрейфа были учтены в качестве аддитивной и мультипликативной поправок в соответствии с выражениями (5) и (6). На практике указанные погрешности (как и представленные на рис. 7 мультипликативные погрешности) могут быть устранены при использовании алгоритмической компенсации с применением соответствующих температурных коэффициентов, полученных в процессе эталонирования.

За время эксплуатации испытываемого ЧЭГ, как показало повторное эталонирование, его ФПП существенно изменилась за счет изменения обоих коэффициентов, что привело к большой погрешности при расчете выходного сигнала. Из рис. 8 (кривая 1) видно, что при использовании коэффициентов a и b на участке от -1500 до 0 мГал погрешность выходного сигнала достигает 14 мГал. Обычно при проведении обработки результатов повторного эталонирования с использованием штатной программы эталонирования «PROIZVOL» коэффициент a сохраняется от предыдущего эталонирования и определяется новое значение только для коэффициента b . При таком способе расчета полученное новое значение коэффициента b отличается от истинного значения (полученного с новым значением коэффициента a) на 0.43%. Замена в ФОП только коэффици-

ента b (при сохранении значения коэффициента a) позволяет уменьшить погрешность на данном участке только до 5 мГал (кривая 2).

При отсутствии возможности проведения полного эталонирования прибора в ограниченном диапазоне измерений (1500 мГал) искажение нелинейного коэффициента a можно скомпенсировать путем оценки и введения в ФОП только коэффициента b , определенного по крайним точкам этого диапазона (для этого достаточно провести два измерения). Для данного прибора погрешность в указанном диапазоне удалось уменьшить до 0.5 мГал (кривая 3).

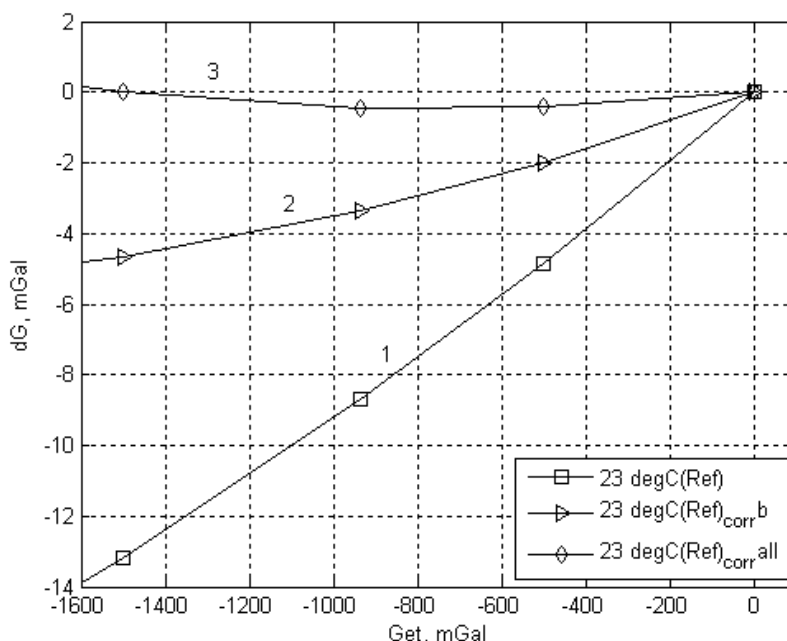


Рис. 8. Погрешность измерений, обусловленная искажением ФПП за время эксплуатации ЧЭГ, и коррекция влияния искажений по измерению двух эталонных сигналов

Выводы

Рассмотрено влияние на погрешность относительного статического маятникового гравиметра возможных аддитивных смещений значений сигнала в его отсчетном устройстве. Выведена точная формула для ФПП прибора, с помощью которой показано, что один из возможных типов смещения при существующей схеме обработки выходных отсчетов гравиметра приводит к появлению дополнительной мультипликативной погрешности. Указанная погрешность может оказаться существенной при проведении аэрогравиметрической съемки.

Наиболее эффективным способом устранения указанных погрешностей является изучение зависимости коэффициентов ФОП от времени и от наиболее существенных возмущающих факторов (температуры, атмосферного давления, вибраций и т.д.), а также учет этих зависимостей при обработке результатов измерений.

В ходе специально проведенного эксперимента на одном из образцов ЧЭГ выявлена температурная зависимость мультипликативной погрешности на уровне $0.0015\%/^{\circ}\text{C}$ и аддитивной на уровне $0.1 \text{ мГал}/^{\circ}\text{C}$. Кроме того, предложена методика обработки результатов эталонирования ЧЭГ на стенде фирмы Аси-

tronic, позволяющая выявить искажения ФПП, произошедшие за время эксплуатации прибора. Это, в свою очередь, позволило обосновать возможность введения в ФОР поправки, определенной путем измерения заведомо известной разности двух входных сигналов (т.е. не проводя полного повторного эталонирования во всем рабочем диапазоне). Результирующую погрешность применения эталонной ФОР с такой поправкой удалось уменьшить с 14 до 0.5 мГал.

Результаты данной работы могут быть использованы при проведении специальных исследований для оценки или калибровки возможных искажений ФПП гравиметра при воздействии и других возмущающих факторов (атмосферного давления, вибраций и т. д.).

Авторы выражают искреннюю благодарность Л.С.Элинсону и С.П.Дмитриеву за полезные обсуждения, а также А.А.Краснову за организацию и помощь в проведении специального эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Несенюк, Л.П.** Морские и авиационные гиросtabilизированные гравиметры / Л.П.Несенюк, В.Г.Пешехонов, Л.С.Элинсон // Материалы 2-й междунар. конф. «Морская и аэрогравиметрия-94», СПб, 1994.
2. **Железняк, Л.К.** Новый этап развития морской гравиметрии / Л.К.Железняк, В.Н.Конешов, Е.И.Попов // Докл. АН, 1994.- Т. 337, №4.- С. 525-527.
3. **Блажнов, Б.А.** Интегрированный мобильный гравиметрический комплекс. Результаты разработки и испытаний / Б.А.Блажнов [и др.] // Применение гравиметрических технологий в геофизике: Сб. статей и докл. / Под ред. В.Г.Пешехонова.- СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 33-44.
4. **Краснов, А.А.** Результаты выполнения региональных аэрогравиметрических съемок в Арктике с использованием гравиметра «Чекан-АМ» / А.А.Краснов, А.В.Соколов, С.В.Усов // Материалы симпозиума между ассоциацией по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях (TG-SMM2010)».- СПб., 22-25 июня 2010.
5. **Блажнов, Б.А.** Исключение эффекта сглаживания гравитационного поля при обработке показаний затухающего аэроморского гравиметра / Б.А.Блажнов, Л.П.Несенюк, Л.С.Элинсон // Материалы 2-й междунар. конф. «Морская и аэрогравиметрия-94».- СПб, 1994.
6. **Железняк, Л.К.** Стабильность упругой системы гравиметра из кварцевого стекла // Физика Земли.- №6.- 2002.- С. 92-96.

Abstract. Assessment is made for the gravimeter output signal error caused by zero shift and distortion of nonlinear transformation function of the device. The methods to eliminate these errors are proposed. Experimental data showing the level of the error caused by distortion of transformation function because of the ambient temperature change are presented.

Key words: Error estimation for gravimeter output signal, experimental data, transformation function distortion, ambient temperature change

Материал поступил 05.04.11