

Поверка конвейерных весов непрерывного действия эталонными грузами без остановки технологического процесса

И. А. ГАЛИН, В. К. ДОНИС

Карагандинский государственный технический университет,
Караганда, Республика Казахстан, e-mail: iagalin@mail.ru

Представлен алгоритм поверки двухканальных конвейерных весов с использованием эталонного груза, имитирующего сыпучий материал. Приведен расчет массы эталонного груза.

Ключевые слова: конвейерные весы, грузоприемное устройство, эталонный груз, сыпучий материал.

An algorithm of two-channel conveyor belt weighers verification using a standart weight is presented. The calculation of standart weight mass simulating a bulk material is shown.

Key words: belt conveyer, load receptor, standard weight, bulk material.

В настоящее время основным методом поверки конвейерных весов (КВ) является метод, описанный в стандарте [1] и Международной рекомендации МОЗМ [2]. Суть метода заключается в сличении значения массы материала, полученного на поверяемых весах, со значением, определенным при взвешивании материала на образцовых весах [3]. Метод дает наиболее точную оценку погрешности КВ, так как при поверке в полной мере учитывают все факторы, влияющие на точность КВ и свойственные процессу транспортирования сыпучего материала по ленте конвейера. Возникновение влияющих механических факторов обусловлено сложным динамическим взаимодействием в системе «сыпучий материал — конвейерная лента — грузоприемное устройство (ГУ) весов — силоизмерительный датчик».

Входной поток транспортируемого сыпучего материала характеризуется рядом параметров, к которым можно отнести линейную плотность материала, скорость его движения по ленте, спектральные характеристики, гранулометрический состав, удельный вес и т. д.

Конвейерная лента, передающая давление от сыпучего материала, является анизотропным нелинейным элементом, и ее параметры (поперечная жесткость, момент инерции, модуль упругости) изменяются в процессе эксплуатации. При взаимодействии движущейся ленты с сыпучим материалом характерно появление ряда дополнительных изменяющихся случайным образом усилий — продольных (многофакторные силы сопротивления движению) и поперечных и динамических при больших скоростях движения ленты. Коэффициент передачи усилия от материала к ленте зависит от многих параметров, в том числе от натяжения и температурных условий эксплуатации ленты, и неоднозначен при их изменении. Продольные и поперечные силы не связаны с информативной составляющей входного грузопотока (массой материала), но оказывают воздействие на роликсоопору ГУ весов. В зависимости от типа ГУ эти силы либо полностью трансформируются в силовое воздействие на силоизмерительный датчик, либо в рационально выбранной конструкции ГУ происходит их частичная компенсация. Важно, что ГУ не является автономным первичным измеритель-

ным преобразователем, и функция его преобразования определяется не только параметрами конвейерной ленты, но и конвейера в целом. Точность передачи усилия от сыпучего материала ленте также зависит от угла наклона конвейера, с которым связана погрешность КВ, обусловленная асимметричной деформацией конвейерной ленты.

В результате выходной сигнал силоизмерительного датчика, помимо информативной составляющей грузопотока сыпучего материала, содержит и неинформативную, оценить которую в связи с указанным комплексом действующих факторов практически невозможно, тем более дать точную количественную оценку, особенно, в реальных производственных условиях.

Основную роль в возникновении механических неинформативных факторов играет конвейерная лента. Сложность процессов имитации деформированного состояния ленты привела к поиску и реализации различных косвенных методов поверки КВ с использованием взвешенного материала, альтернативных прямому.

Прямой метод в производственных условиях часто оказывается невыполним по ряду объективных причин: из-за отсутствия статических весов для взвешивания проб материала, сложности транспортных схем для доставки отобранных проб к месту взвешивания, большой длительности этих процедур. Однако при этом к КВ предъявляют все требования по обеспечению их регламентированной точности калибровки и поверки.

Решение данной проблемы при поверке КВ может быть связано с использованием такого косвенного метода, который по своей точности мог бы в максимальной степени приблизиться к прямому методу.

В [4, 5] представлены подходы по реализации косвенного метода поверки, суть которых заключается в использовании в конструкции КВ независимых каналов измерения массы сыпучего материала в виде двух ГУ, электрически и механически не связанных друг с другом (рис. 1). При этом поверка осуществляется с использованием эталонного груза, периодически догружающего каждое из ГУ при транспортировании сыпучего материала.

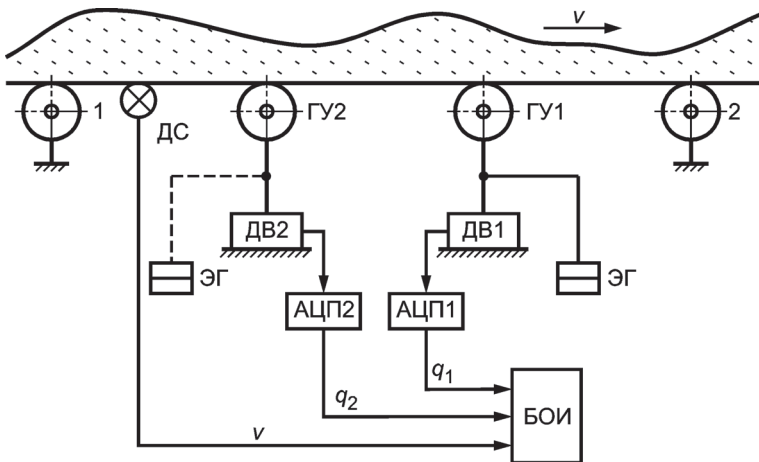


Рис. 1. Схема двухканальных конвейерных весов:

1, 2 — стационарные роликоопоры; ГУ1, ГУ2 — грузоприемные устройства первого и второго каналов измерения; ДВ1, ДВ2 — силоизмерительные датчики; АЦП1, АЦП2 — аналого-цифровые преобразователи; ДС — датчик скорости; ЭГ — эталонный груз; БОИ — блок обработки информации

Отличительная особенность данного метода заключается в том, что при поверке воспроизводятся все неинформативные факторы, свойственные процессу взаимодействия сыпучего материала с конвейерной лентой при его движении по ней. Данные факторы необходимо воспроизводить при любой имитации грузопотока сыпучего материала.

В общем случае поверку КВ выполняют в три этапа:

при транспортировании материала конвейером за время, близкое к времени, в течение которого через КВ проходит масса сыпучего материала, соответствующая наименьшему пределу взвешивания по [6], счетчики каналов измерений фиксируют накопленную массу по каждому из каналов $Q_{1м}$, $Q_{2м}$;

проводят догрузку ГУ первого канала измерения эталонным грузом массой m_r и при достижении счетчиком второго канала показания $Q_{2м}^*$, равного значению $Q_{2м}$, полученному на первом этапе, фиксируют показания счетчика первого канала $Q_{1(м+г)}$;

проводят догрузку ГУ второго канала измерения аналогичным эталонным грузом и при достижении счетчиком

первого канала показания $Q_{1м}^*$, равного значению $Q_{1м}$, фиксируют показания счетчика второго канала $Q_{2(м+г)}$.

Критерием оценки погрешности предлагаемого косвенного метода поверки является отличие расчетного значения имитируемой массы материала и разности между показаниями отдельных каналов после догрузки и до догрузки эталонным грузом.

Поскольку $\Delta Q_{1г} = Q_{1(м+г)} - Q_{1м}$, $\Delta Q_{2г} = Q_{2(м+г)} - Q_{2м}$, то коэффициенты коррекции каналов измерений определяются выражениями

$$k_{1к} = Q_{1им} / (Q_{1(м+г)} - Q_{1м}^*);$$

$$k_{2к} = Q_{2им} / (Q_{2(м+г)} - Q_{2м}^*),$$

где $Q_{1им}$, $Q_{2им}$ — расчетная масса материала, имитируемая эталонными грузами.

Данные значения имитируемой массы рассчитывают следующим образом:

$$Q_{1им} = q_{1им} v t_1; Q_{2им} = q_{2им} v t_2,$$

где $q_{1им} = m_r / l_{1в}$, $q_{2им} = m_r / l_{2в}$ — имитируемая линейная плотность материала для первого и второго ГУ; $l_{1в}$, $l_{2в}$ — длина весовых участков для первого и второго ГУ; v — скорость конвейерной ленты; t_1 — время достижения счетчиком первого канала показания $Q_{1(м+г)}$; t_2 — время достижения счетчиком второго канала показания $Q_{2(м+г)}$.

Погрешность поверки КВ определяется как $\delta_n = (k_k - 1) \cdot 100$, где $k_k = (k_{1к} + k_{2к}) / 2$ — среднее значение коэффициента коррекции КВ.

Рассмотренный вариант алгоритма поверки характерен только для идеальных условий ее проведения, когда производительность конвейера на всех трех этапах постоянна. При нарушении условия постоянства производительности конвейера в процессе транспортирования материала измерения проводят за выбранное время поверки T_n , которое должно оставаться неизменным на всех этапах, а коэффициенты K_k следует определять как

$$k_{1к} = Q_{1им} / (Q_{1(м+г)} - \gamma Q_{2м}^*);$$

$$k_{2к} = Q_{2им} / (Q_{2(м+г)} - Q_{1м}^* / \gamma), \quad (1)$$

где $\gamma = Q_{1м} / Q_{2м}$ — коэффициент соотношения чувствительностей каналов измерений.

Для нахождения аналитической зависимости определения допускаемого значения массы эталонного груза рассмотрим реакции весовых роликоопор обоих ГУ с учетом механизма их взаимодействия с конвейерной лентой и материалом (рис. 2). С позиций теоретической механики о реакциях и связях лента рассматривается как несвободное тело, весовая роликоопора ГУ — как связь, ограничивающая свободу перемещения ленты, а реакция связи направлена по нормали к цилиндрической поверхности роликов весовой роликоопоры [4].

Графическое представление зависимости между физическими величинами, характеризующими

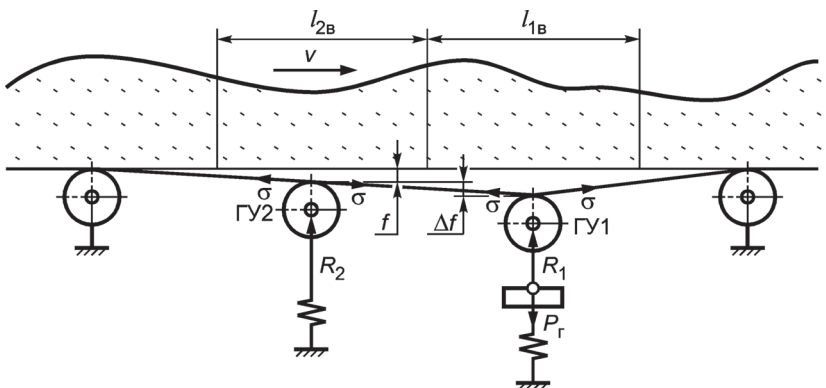


Рис. 2. Механизм взаимодействия сыпучего материала с весовыми роликоопорами КВ

процесс взаимодействия ГУ весов и конвейерной ленты (рис. 3), основано на подходе, предложенном в [7]. Прямая $G = f_1(y)$ представляет зависимость давления, передаваемого лентой ГУ, а прямая $R = \varphi(f)$ — уравновешивающую силу ГУ. В случае полной загрузки ленты сыпучим материалом реакции весовых роlikоопор ГУ1 и ГУ2 (т. С на пересечении прямых $G = f_1(y)$ и $R = \varphi(f)$) будут определяться следующим выражением:

$$R_G = G c l_B / (c l_B + \sigma),$$

где G — вес материала на весовом участке конвейерной ленты; c — жесткость силоизмерительного датчика; l_B — длина весового участка ленты ГУ1 и ГУ2; σ — натяжение конвейерной ленты. Весовым участком конвейерной ленты, например для ГУ1, является расстояние, равное полусумме расстояний между весовой роlikоопорой ГУ1 и ближайшими весовой роlikоопорой ГУ2 и стационарной роlikоопорой конвейера.

Рассмотрим в качестве примера догрузку ГУ1 эталонным грузом $P_r = 0,5G$, причем прогиб силоизмерительного датчика f_G для наглядности представим соизмеримым с естественной просадкой конвейерной ленты $y_{\max G}$, а длины весовых участков ГУ1 и ГУ2 (l_{1B} , l_{2B} , см. рис. 2) равны.

При загрузке ленты сыпучим материалом, вес которого (по сравнению с вариантом полной загрузки) уменьшен на вес эталонного груза $G - P_r$ (прямая $G' = f(y)$), реакция роlikоопоры ГУ1 определяется в т. А на пересечении прямых $G' = f(y)$ и $R = \varphi(f)$ и выражается как

$$R_{1(G-P_r)} = (G - P_r) c l_B / (c l_B + \sigma). \quad (2)$$

При догрузке роlikоопоры непосредственно эталонным грузом ее просадка увеличивается на $\Delta f = P_r / c$, и происходит опускание ленты с материалом, что вызывает неуравновешенность ГУ1 из-за разгружающего действия силы натяжения ленты σ . При этом реакция роlikоопоры ГУ1 от воздействия сыпучего материала через конвейерную ленту уменьшается и становится равной $R_{1(G-P_r)}^*$. Значение $R_{1(G-P_r)}^*$ определяется в т. В на прямой $G' = f(y)$.

Зависимость $G' = f(y)$ можно представить двумя уравнениями:

$$f_{(G-P_r)} / y_{\max(G-P_r)} + R_{1(G-P_r)} / (G - P_r) = 1; \quad (3)$$

$$(f_{(G-P_r)} + P_r / c) / y_{\max(G-P_r)} + R_{1(G-P_r)}^* / (G - P_r) = 1. \quad (4)$$

Из уравнения (3) найдем

$$y_{\max(G-P_r)} = f_{(G-P_r)} (G - P_r) / [(G - P_r) - R_{1(G-P_r)}].$$

С учетом (2) и равенства

$$f_{(G-P_r)} = R_{1(G-P_r)} / c = (G - P_r) l_B / (c l_B + \sigma)$$

при решении уравнения (4) получим

$$R_{1(G-P_r)}^* = (G - P_r) c l_B / (c l_B + \sigma) - P_r \sigma / c l_B.$$

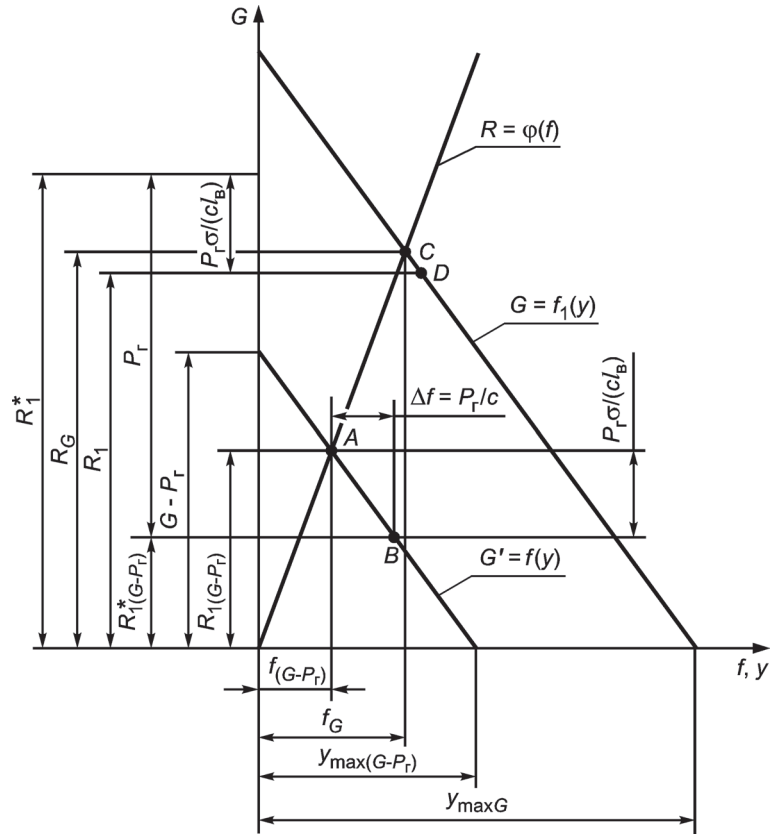


Рис. 3. График взаимодействия КВ с конвейерной лентой

Однако при просадке роlikоопоры ГУ1 под действием эталонного груза роlikоопора ГУ2 оказывается выше на $\Delta f = P_r / c$, и реакция последней из-за нагружающего действия силы натяжения ленты увеличивается:

$$R_2^* = (G - P_r) c l_B / (c l_B + \sigma) + P_r \sigma / (c l_B).$$

Увеличение реакции роlikоопоры ГУ2 на $\sigma P_r / c l_B$ из-за взаимовлияния по фактору натяжения ленты приводит к уменьшению реакции роlikоопоры ГУ1 на аналогичное значение. Таким образом, результирующая реакция от ленты с материалом и образцовым грузом имеет вид:

$$R_1 = (G - P_r) c l_B / (c l_B + \sigma) + P_r - 2 \sigma P_r / (c l_B). \quad (5)$$

Реакции (5) будет соответствовать т. D на прямой $G = f_1(y)$.

Запишем абсолютное значение уменьшения реакции роlikоопоры ГУ1 по сравнению с вариантом полной загрузки ленты материалом:

$$\Delta R_1 = R_G - R_1 = P_r \sigma (c l_B + 2 \sigma) / [c l_B (c l_B + \sigma)].$$

Масса эталонного груза выбирается из условия, чтобы относительное изменение реакции роlikоопоры ГУ1 из-за натяжения ленты не превысило заданной погрешности имитации сыпучего материала эталонным грузом.

Погрешность имитации сыпучего материала:

$$\delta_{\text{и}} = \frac{\Delta R_1}{R_G} = \frac{P_r}{G} \frac{\sigma (c l_B + 2 \sigma)}{c^2 l_B^2}.$$

Зададим допустимое значение погрешности $\delta_{\text{и}}$ и найдем массу эталонного груза:

$$m_{\text{г}} = P_{\text{г}} / g \leq \delta_{\text{и}} G c^2 l_{\text{в}}^2 / [\sigma (c l_{\text{в}} + 2\sigma) g], \quad (6)$$

где g — ускорение свободного падения.

Преобразуем уравнение (6) к следующему виду:

$$\frac{P_{\text{г}}}{G} = \frac{\delta_{\text{и}}}{\sigma / (c l_{\text{в}} + \sigma)} \frac{c^2 l_{\text{в}}^2}{(c l_{\text{в}} + 2\sigma)(c l_{\text{в}} + \sigma)}.$$

Так как $c l_{\text{в}} \gg \sigma$, то можно принять, что

$$c^2 l_{\text{в}}^2 / [(c l_{\text{в}} + 2\sigma)(c l_{\text{в}} + \sigma)] \approx 1,0,$$

тогда $P_{\text{г}}/G = \delta_{\text{и}}/\delta_{\text{с}}$, где систематическая погрешность КВ

$$\delta_{\text{с}} = \sigma / (c l_{\text{в}} + \sigma). \quad (7)$$

Выбор массы эталонного груза должен соответствовать условию: суммарная линейная плотность реальной нагрузки (материала) $q_{\text{м}}$ и догружающего эталонного груза $P_{\text{г}}$, имитирующего материал, не должны превышать номинальной линейной плотности $q_{\text{н}}$ материала на конвейере, т. е.

$$P_{\text{г}} l_{\text{в}}^{-1} + q_{\text{м}} \leq q_{\text{н}}.$$

С учетом изложенного выше механизма взаимовлияния каналов измерений КВ при их одновременном догружении эталонным грузом полученные в (1) коэффициенты коррекции будут содержать методическую погрешность измерения, поскольку, например, реакции ненагруженной образцовым грузом роликоопоры ГУ2 на первом и втором этапах поверки уже отличаются на $\sigma P_{\text{г}} / (c l_{\text{в}})$.

Данная методическая погрешность является систематической и определяется выражением

$$\delta_{\text{м}} = 3\sigma / (c l_{\text{в}} - 3\sigma). \quad (8)$$

С учетом (8) коэффициенты коррекции каналов измерений в окончательном виде могут быть представлены как

$$k_{1\text{к}}^* = Q_{1\text{им}} / \left[(Q_{1(\text{м}+\text{г})} - \gamma Q_{2\text{м}}^*) (1 + \delta_{\text{м}}) \right];$$

$$k_{2\text{к}}^* = Q_{2\text{им}} / \left[(Q_{2(\text{м}+\text{г})} - Q_{1\text{м}}^* / \gamma) (1 + \delta_{\text{м}}) \right].$$

Методическая погрешность $\delta_{\text{м}}$ имеет тенденцию к уменьшению при увеличении длины весового участка каждого из ГУ, что возможно при использовании многороликовых ГУ с несколькими роликоопорами.

Погрешности КВ можно разделить на три группы. К первой группе относится погрешность от просадки силоизмерительного датчика, которая является детерминированной функцией входного информативного параметра (линейной плотности материала) и зависит от просадки ГУ, а также неинформативного параметра (натяжения ленты, длины весового участка) и является систематической погрешностью. Для рассматриваемой схемы КВ (см. рис. 1) она определяется выражением (7).

Ко второй группе относятся погрешности, обусловленные такими факторами, присущими КВ, как натяжение ленты в

месте установки грузоприемного устройства КВ, сила сопротивления движению ленты, динамика материала и ленты, длина конвейера, асимметричная деформация ленты на наклонных конвейерах. Данные погрешности также являются известными детерминированными функциями случайных информативных и неинформативных параметров и могут быть исключены из результата измерения при проведении поверки КВ в нормальных условиях в рабочей точке диапазона измерения.

К третьей группе можно отнести случайные погрешности, обусловленные собственными самопроизвольными отклонениями параметров реальной функции преобразования КВ. Как правило, не удастся установить закономерную связь этих отклонений с какими-либо причинами, как не удастся дать им качественную и количественную оценку.

Погрешности первой и второй групп определяют основную погрешность КВ в нормальных условиях. Поскольку отклонение какого-либо неинформативного параметра от его значения, при котором калибровали КВ в рабочем режиме, приводит к изменению основной погрешности, то погрешности второй группы будут являться дополнительными.

При поверке КВ эталонным грузом в результатах измерений будет отсутствовать основная погрешность за исключением только части систематической погрешности, равной погрешности имитации материала $\delta_{\text{и}}$. Что касается дополнительной погрешности КВ, возникающей при изменениях производительности конвейера или какого-либо из неинформативных влияющих факторов, то ее появление не отразится на результатах измерений и погрешности поверки при условии равенства дополнительных погрешностей для обоих каналов измерений. Данное условие может быть выполнено при использовании в кинематической схеме КВ двух ГУ с одинаковыми метрологическими характеристиками. При этом коэффициент соотношения чувствительностей каналов измерений γ будет неизменным на всех этапах проведения поверки, даже при возможных неравномерностях грузопотока материала.

Результаты экспериментальных исследований рассмотренного метода поверки представлены в [8].

Изложенные подходы по реализации косвенного метода поверки эталонным грузом не ограничиваются только двухканальными КВ и могут быть применены и для многоканальных.

Использование предлагаемого метода поверки позволит повысить точность взвешивания сыпучего материала на ленточном конвейере, значительно сократить время на проведение поверки, поскольку она может проводиться в любой момент при возникновении сомнений в правильности показаний весов без остановки технологического процесса в условиях непрерывного производства.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 8.005—2002.** ГСИ. Весы непрерывного действия конвейерные. Методика поверки.
2. **OIML R 50-1:1997.** Continuous totalizing automatic weighing instruments (beltweighers). Part 1: Metrological and technical requirements, Tests.
3. **ГОСТ 29329—92.** Весы для статического взвешивания. Общие технические требования.

4. **Донис В. К.** Повышение точности и эффективности конвейерных весов // Измерительная техника. 1996. № 9. С. 25—29; **V. K. Donis.** Increasing the accuracy and efficiency of a conveyor balance // Measurement Techniques. 1996. V. 39. N. 9. P. 928—933.

5. **Донис В. К., Рачковский А. Е., Гудовская Н. Ю.** Состояние и перспективы разработки способов поверки конвейерных весов // Измерительная техника. 2003. № 9. С. 28—32; **V. K. Donis, A. E. Rachkovskii, N. Yu. Gudovskaya.** Methods of Verifying Continuous Automatic Belt Weighers: State and Prospects // Measurement Techniques. 2003. V. 46. N. 9. P. 851—856.

6. **ГОСТ 30124—94.** Весы и весовые дозаторы непрерывного действия. Общие технические требования.

7. **Высочин Е. М.** Влияние упругих свойств ленты на работу конвейерных весов // Сб.: Вопросы рудничного транспорта. 1958. Вып. 2. С. 142—152.

8. **Бочаров А. В. и др.** Испытания и опыт применения косвенного способа поверки и калибровки конвейерных весов // Главный метролог. 2007. № 6. С. 40—42.

Дата принятия 06.06.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

006.92

Релятивистские эффекты в мобильных часах

В. Ф. ФАТЕЕВ, В. П. СЫСОЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: fateev@vniiftri.ru

На основе общей теории относительности получены практические формулы для вычисления релятивистских эффектов в часах, движущихся в аномальном гравитационном поле Земли. Рассмотрены методы компенсации эффектов и определена погрешность компенсации на основе навигационных определений на маршруте движения часов в системах ГЛОНАСС/GPS.

Ключевые слова: мобильные часы, релятивистские эффекты, гравитационный потенциал, методы компенсации.

On the basis of the general theory of relativity the practical formulas for calculation of relativistic effects in clocks moving in Earth's anomalous gravitational field have been derived. Clock's errors caused by these effects are evaluated and methods of compensation of the errors in application to GLONASS/GPS systems are considered.

Key words: mobile clocks, relativistic effects, gravitational potential, compensation methods.

Проблема учета релятивистских эффектов в мобильных часах исследована как в отечественных, так и в зарубежных работах [1—7]. Однако полученные результаты применимы лишь для коротких маршрутов и при ограниченной стабильности стандартов частоты мобильных часов. С ростом стабильности стандартов повышаются требования к учету релятивистских эффектов, особенно при глобальных перемещениях в условиях влияния аномалий гравитационного поля Земли вдоль маршрута движения. В связи с этим необходимо рассматривать релятивистские эффекты с позиций общей теории относительности (ОТО) как при измерении времени, так и частоты, а также оценивать предельную точность их учета и компенсации на основе использования текущих навигационных определений мобильных часов в системах ГЛОНАСС/GPS.

Частота и время в мобильных часах в рамках ОТО. Закон изменения собственного (непосредственно измеряемого) времени для хранителя частоты и времени, движущегося относительно поверхности Земли, выведем применительно к вращающейся вместе с Землей геоцентрической земной системе координат (ITRF — International Terrestrial

Reference Frame) с единичными векторами **i**, **j**, **k** по осям XYZ, соответственно. Для этого воспользуемся общим выражением для квадрата пространственно-временного интервала ds [8]:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 + 2g_{0\alpha}dx^\alpha cdt + g_{\alpha\beta}dx^\alpha dx^\beta, \quad (1)$$

где c — скорость света; dt — бесконечно малый интервал координатного времени t , не зависящего от параметров гравитационного поля; g_{00} , $g_{0\alpha}$, $g_{\alpha\beta}$ — компоненты четырехмерного метрического тензора g_{ik} гравитационного поля в выбранной системе отсчета; dx^α , dx^β — пространственные бесконечно малые интервалы; здесь и далее $\alpha, \beta = 1; 2; 3$, $i, k = 0; 1; 2; 3$.

Интервал ds инвариантен к выбору системы отсчета и, следовательно, не меняет значения в любой мгновенно введенной инерциальной невращающейся системе отсчета [8]. Поэтому в инерциальной системе

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 + g_{11}dx^2 + g_{22}dy^2 + g_{33}dz^2,$$

где $g_{\alpha\alpha} = 1$, $g_{00} = -1$. Для двух событий в одной и той же пространственной точке ($dx = dy = dz = 0$) $ds^2 = g_{00}c^2dt^2 = -c^2d\tau^2$,