

ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 528.541.4(088.8)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ВИЗИРНОЙ ЛИНИИ ЖИДКОСТНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ ПОДВЕСНОГО ТИПА

*Сафарян В.А, Гераимчук М.Д., Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

Отражены теоретические аспекты стабилизации визирной, (лазерной) линии жидкостным компенсатором подвешенного типа, который был использован в приборе вертикального проектирования координат точек ЛаСК-1. Получены рабочие формулы для данного типа стабилизатора, исследованы составляющие ошибки компенсации, вызванные изменениями геометрических и оптических параметров подвески

Вступлення. Постановка задачі

В експериментальному образці прибора вертикального проектування см. [1] був применений жидкостний компенсатор підвешеного типу, механізм стабілізації компенсатора оснований на використанні преломлення світлових променів жидкостним клином.

Простота конструкції, висока чутливість, широкий діапазон роботи компенсатора, наявність коректуючого механізму, який дозволяє зменшити помилку, викликану термічним зміною показателя преломлення жидкості, а також спеціальна конструкція оптичного каналу, виключаюча вібрації і колибання відкритої поверхності жидкості, дозволили підвищити точність стабілізації і довести погрешність самоустановки лінії визирова́ння в приборі до 2-3" при нахилі корпусу прибора на $\pm 10-12'$.

Теорія стабілізації звичайних жидкостних компенсаторів достатньо подроби́то розглянуті [2], теоретичні основи жидкостних компенсаторів підвешеного типу, із-за їх конструктивних особливостей будуть відрізнятися від звичайних.

Решение поставленной задачи

Отличительная особенность подвешенного компенсатора (см. рис.1 а,б), по сравнению с обычным, определяется тем, что он совмещает в себе два основных элемента, которые и обеспечивают ему самоустановку линии визирова́ния. Первый - это скрещённые металлические нити, на которых подвешен сосуд, и второе – налитая в сосуд оптически прозрачная жидкость. Действие такой системы основано на механическом и оптическом взаимодействии, а потому взаимосвязь угла наклона прибора ε и отклонения луча α на выходе, осуществляется через коэффициенты оптического K_o и механического K_m умножения. Эта взаимосвязь и определяет основное условие стабилизации линии проектування.

Учитывая закон преломления света, можно получить приближённую формулу взаимосвязи угла наклона луча α и преломляющего угла жидкостного клина θ

при проходженні луча через оптичний клин для малих кутів нахилу [3]:

$$\alpha = -(n-1) \cdot \Theta = K_o \cdot \Theta, \quad (1)$$

де n – показатель преломлення рідкості; $(n-1)=K_o$ – оптичний коефіцієнт зміщення положення луча.

В формулі (1) преломлюючий кут рідкостного клина Θ можна зв'язати з кутом нахилу приладу через коефіцієнт механічної компенсації підвески:

$$\Theta = K_m \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Підставив (2) в (1) отримаємо формулу основного умови стабілізації для компенсаторів типу “підвешеної посуд”:

$$\alpha = -(n-1) \cdot K_m \cdot \varepsilon = -K_o \cdot K_m \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что полная компенсация угла наклона прибора, соблюдается в том случае, когда $\alpha = -\varepsilon$, то есть для полной компенсации угла α и соблюдения равенства необходимо иметь подвеску с коэффициентом $K_m \approx -2$, или $K_m \approx -1$, при условии, что компенсационный блок конструктивно выполнен по а.с. №1508096 (см. рис.1а). Представленная конструкция компенсатора позволяет повысить точность и расширить пределы компенсации за счёт уменьшения коэффициента K_m и улучшения демпфирующих свойств подвешенного элемента, в данном случае сосуда с жидкостью.

Вторая особенность компенсатора заключается в том, что при наклоне сосуда из-за перелива жидкости происходит смещение (ΔX) центра тяжести (Ц.Т.) сосуда с жидкостью, в основном вдоль оси X . Смещение приводит к снижению устойчивости подвески, дополнительному наклону сосуда и в итоге, к увеличению ошибки стабилизации. Для придания устойчивости и минимизации величины смещения, авторами предложено изменение формы днища самого сосуда, который выполнен в виде стеклянной пластины, у которой одна сторона (внутренняя) имеет форму сферической поверхности, а другая (наружная) – плоскую. Изменение формы сосуда не влечёт за собой существенных изменений в основное условие компенсации (3), так как в результате наклона сосуда образуется также оптический клин между свободной поверхностью жидкости и плоской поверхностью нижнего основания сосуда.

Проведенные аналитические исследования величины смещения $\Delta X_{ц.т.}$ для различных сосудов и уровней жидкости в них в зависимости от угла наклона ε' сосуда, позволили получить следующие уравнения:

а) для сосуда с плоским дном:

$$\Delta X_{ц.т.} = c^2 \cdot \Delta \varepsilon' / 12 \cdot H \quad (4)$$

б) для сосуда со сферическим дном, где высота столба жидкости меньше высоты сферического сегмента ($H_{ж} < H_c$):

$$\Delta X_{ц.т.} = (R - 3 \cdot H_{ж}) \cdot \Delta \varepsilon' / \approx R \cdot \Delta \varepsilon' \quad (5)$$

в) для сосуда со сферическим дном, где высота столба жидкости больше высоты сферического сегмента ($H_{ж} > H_c$):

$$\Delta X_{ц.т.} = c^2 / (3H_{ж} - H_c) \cdot \Delta \varepsilon' / \quad (6)$$

где $H_{ж}$, H_c – высота столба жидкости и высота сосуда; c – диаметр сосуда; R – радиус сферического основания сосуда.

Вывод формулы коэффициента механической компенсации K_m для системы типа “подвесной сосуд” был осуществлён в соответствии с методикой, предложенной в [2], где использовалась теория равновесия материальных тел. Как известно, полученная в ней формула определяет зависимость коэффициента механической компенсации от геометрических параметров подвески:

$$K_m = -\frac{4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c}{4 \cdot b^2 \cdot c^2 + c \cdot (a - c)^3 + 4 \cdot h \cdot (a - c)^2 \cdot L}, \quad (7)$$

где (a, b, c, h) – геометрические параметры подвески; L – расстояние от нижней базы (c) до Ц.Т. чувствительного элемента.

Рассматривая рис.1,b, можно таким же образом составить систему уравнений равновесия и для подвески с сосудом, внутри которой налита оптически прозрачная жидкость, приравняв к нулю сумму проекций всех сил на каждую координатную ось относительно точки А:

$$\begin{aligned} \sum N_x &= 0, \\ \sum N_y &= 0, \\ \sum P_x &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

В отличие от подвески [2], где чувствительный элемент, имеющий стабильный Ц.Т. подвешен на подвеске, выполненной в форме трапеции, здесь подвеска имеет форму скрещенных нитей и на неё, кроме веса сосуда P_1 , действует и вес жидкости, налитой в этот сосуд P_2 , силы натяжения нитей N_i . Точка приложения силы P_2 , при наклоне сосуда, перемещается на величину $\Delta X=f(\varepsilon)$ и зависит от угла наклона сосуда ε' . При составлении уравнений равновесий, все перечисленные факторы необходимо учесть, поскольку на траекторию движения точки влияют форма сосуда, высота столба жидкости в сосуде.

Раскрывая систему уравнений (8) можно получить:

$$\begin{aligned} -N_1 \cdot \cos(\alpha'_1 + \varepsilon) + N_2 \cdot \cos(\alpha'_2 - \varepsilon) &= 0, \\ -N_1 \cdot \cos(\alpha'_1 + \varepsilon) + N_2 \cdot \cos(\alpha'_2 - \varepsilon) - (P_1 + P_2) &= 0, \\ -P_1 \cdot [b \cdot \cos(\alpha'_1 + \varepsilon) - c/2 \cdot \cos(\varepsilon) + L \cdot \sin(\varepsilon)] - P_2 \cdot [b \cdot \cos(\alpha_1 + \varepsilon) - c/2 \cdot \cos(\varepsilon) - R \cdot \sin \varepsilon'] + N_2 \cdot a \sin(\alpha_2 - \varepsilon) &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Для решения системы уравнений (9) необходимо предварительно выразить углы α_1 , α_2 и ε' через геометрические параметры подвески (a, b, c, h) , коэффициент механической компенсации K_m и угол наклона прибора ε . Группируя члены содержащие K_m , можно получить квадратное уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} a \cdot c^2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{2 \cdot A^2} \cdot K_m^2 + \\ + \frac{4 \cdot c^2 \cdot \varepsilon \cdot b^2 - c^2 \cdot \varepsilon \cdot A^2 + a \cdot \varepsilon \cdot A^2 \cdot c - 2 \cdot a \cdot c \cdot h \cdot \varepsilon^2 \cdot A + 4 \cdot M \cdot \varepsilon \cdot A^2 \cdot h}{4 \cdot A^2 \cdot h} \cdot K_m - \\ - \frac{a \cdot \varepsilon \cdot c \cdot (2 \cdot b^2 - a \cdot h \cdot \varepsilon)}{2 \cdot A^2 \cdot h} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

где (a, b, c, h) – геометрические параметры подвески; $A = (a - c)$; ε – угол наклона корпуса прибора в рад; $M = (-P_1L + P_2k_i)/(P_1 + P_2) \approx L - k_i/f$ – центр инерции системы подвеса; P_1, P_2 – вес сосуда и жидкости; L – расстояние от базы c до Ц.Т. сосуда с жидкостью; k_i – коэффициент, определяемый параметрами применяемого сосуда, его формой и высотой столба жидкости в нём (4-6); $f = P_1/P_2$.

Упрощая уравнение (10) и приведя его к виду удобному для применения и исследований, получаем выражение (11) определяющее коэффициент механической компенсации для системы типа “подвесной сосуд”.

$$K_m^\varepsilon = \frac{4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c - 2 \cdot a^2 \cdot c \cdot h \cdot |\varepsilon|}{4 \cdot b^2 \cdot c^2 + (a - c)^3 \cdot c - 2 \cdot a \cdot h \cdot |\varepsilon| \cdot c \cdot (a - c) + 4 \cdot M \cdot (a - c)^2 \cdot h}, \quad (11)$$

Полученное выражение в отличие от (7), кроме геометрических параметров подвески, дополнительно включает в себя угол наклона прибора ε , центр инерции системы подвеса M , определяемый весом сосуда и жидкости, величиной смещения Ц.Т. по оси X.

Формулу (11) можно представить в виде двух составляющих, основной формулы (7) и приращения к нему ΔK_m :

$$K_m^\varepsilon = K_m + \Delta K_m = \left[\frac{4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c}{4 \cdot c^2 \cdot b^2 + c \cdot A^3 + 4 \cdot L \cdot A^2 \cdot h} - \frac{2 \cdot a^2 \cdot h \cdot c \cdot |\varepsilon|}{4 \cdot c^2 \cdot b^2 + c \cdot A^3 - 2 \cdot a \cdot h \cdot |\varepsilon| \cdot A \cdot c + 4 \cdot M \cdot A^2 \cdot h} \right], \quad (12)$$

где (a, b, c, h) – геометрические параметры подвески; $A = (a - c)$; M – центр инерции системы подвеса; ε – угол наклона прибора.

Графики зависимости коэффициента механической компенсации K_m от угла наклона прибора ε и величины смещения центра тяжести L относительно базы c представлены на рис.2 (a,b). Углы наклона ε на графиках увеличены специально для выявления формы графической модели.

Из графиков видно, что система подвески находится в устойчивом состоянии, когда L положительна и Ц.Т. находится ниже основания базы c . Существенно, на коэффициент механической компенсации влияет смещение ($\pm L$) Ц.Т. (вверх или вниз) относительно базы c , причём смещение вверх ($-L$) в 2 раза чувствительнее смещения вниз ($+L$).

Справедливость полученных формул (11,12) подтверждается тем, что при весе жидкости $P_2 = 0$ и $\varepsilon = 0$, они превращаются в (7). Т.е. при отсутствии жидкости величина K_m определяется по обычной формуле. При $P_2 \neq 0$ и $\varepsilon \neq 0$ на величину коэффициента механической компенсации K_m влияют наклоны прибора, положение Ц.Т. (L) относительно базы c .

Величина изменения коэффициента механической компенсации ΔK , при изменении угла наклона $\Delta \varepsilon$, линейных размеров $\Delta a, \Delta b, \Delta c$ подвески, положения Ц.Т. ΔL относительно базы c определяется, дифференцированием формулу (11) по этим параметрам.

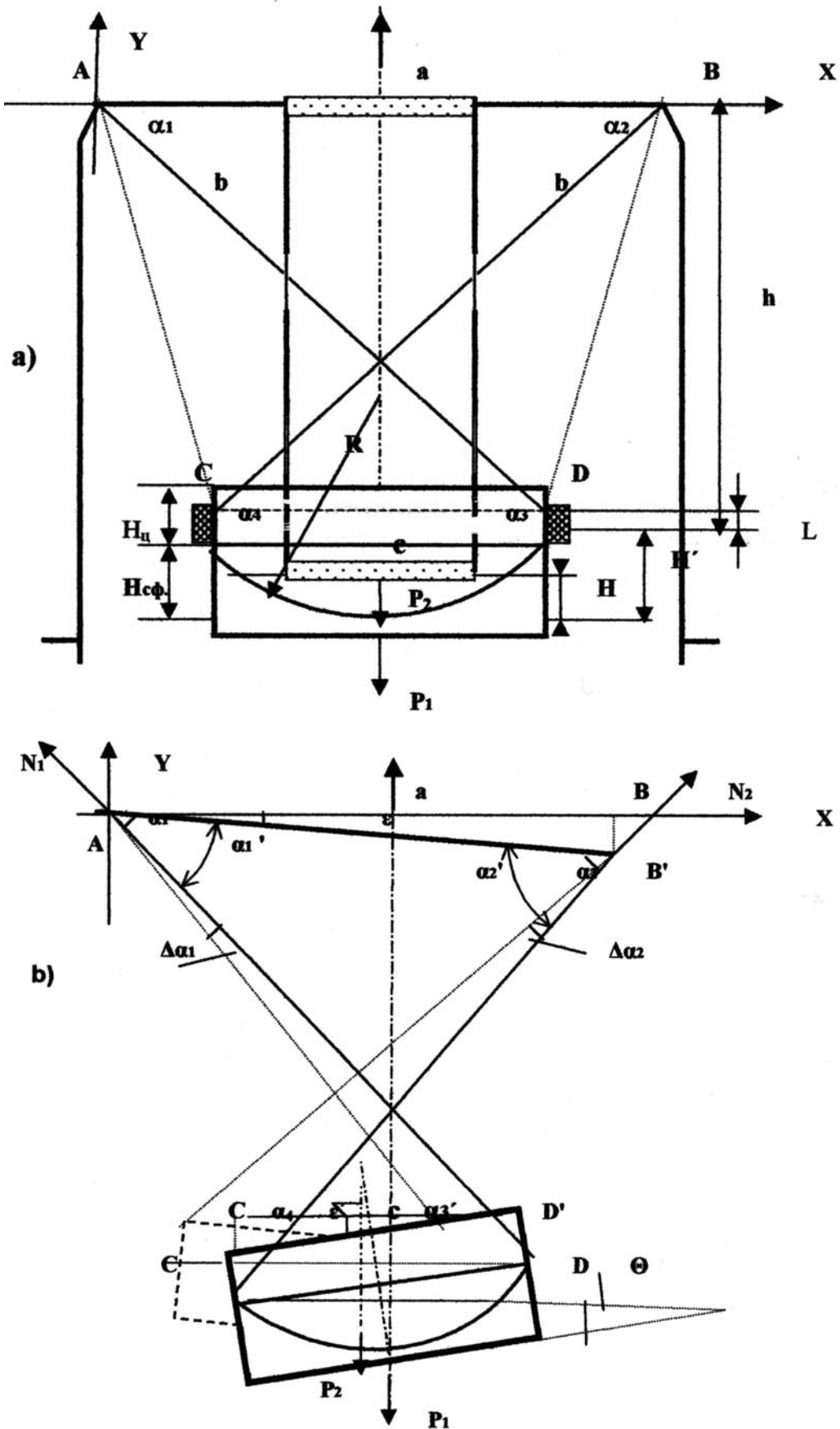


Рисунок 1 - Конструкція компенсатора

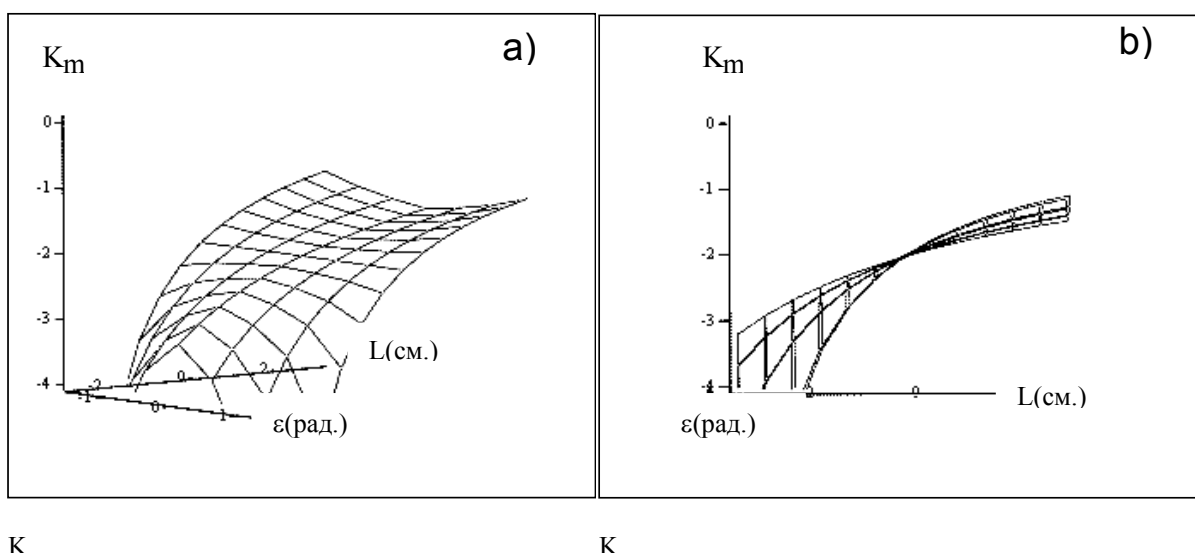


Рисунок 2 - Зависимости коэффициента механической компенсации K_m от угла наклона прибора ε и величины смещения центра тяжести L

После дифференцирования, заменяя дифференциалы малыми приращениями, получаем следующие зависимости:

$$\Delta K_\varepsilon = \frac{2 \cdot a^2 \cdot c \cdot h \cdot Z - 4 \cdot (2 \cdot b^2 \cdot c - a^2 \cdot c \cdot h \cdot \varepsilon) [a \cdot h \cdot c (a - c)]}{Z^2} \cdot \Delta \varepsilon, \quad (13)$$

$$\Delta K_a = \frac{-4 \cdot (b^2 \cdot c - a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c) \cdot Z + (4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c - 2 \cdot a^2 \cdot c \cdot h \cdot \varepsilon) \cdot \left[3A^2 \cdot c - 2 \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c \cdot A - 2a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c + 8 \cdot \left(L - \frac{R}{n} \right) \cdot A \cdot h \right]}{Z^2} \cdot \Delta a, \quad (14)$$

$$\Delta K_b = -8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \frac{Z - 4 \cdot c^2 \cdot b^2 + 2 \cdot c^2 \cdot a \cdot h \cdot \varepsilon}{Z^2} \cdot \Delta b, \quad (15)$$

$$\Delta K_c = \frac{2 \cdot (2 \cdot a \cdot b^2 - a^2 \cdot h \cdot \varepsilon) \cdot \left\{ -Z + c \cdot \left[8 \cdot b^2 \cdot c - 3 \cdot A^2 \cdot c + A^2 - 2 \cdot a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot A + 2 \cdot a \cdot h \cdot \varepsilon \cdot c - 8 \cdot \left(L - \frac{R}{n} \right) \cdot A \cdot h \right] \right\}}{Z^2} \cdot \Delta c, \quad (16)$$

$$\Delta K_L = \frac{4 \cdot (4 \cdot a \cdot b^2 \cdot c - 2 \cdot a^2 \cdot c \cdot h \cdot \varepsilon)}{Z^2} \cdot (a - c)^2 \cdot h \cdot \Delta L, \quad (17)$$

где (a, b, c, h) – геометрические параметры подвески; ε – угол наклона прибора; Z – знаменатель формулы (11).

Подставляя значения геометрических параметров подвески в (13-17), для $K = -2$ ($a = 6$ см, $c = 3$ см, $b = 7,5$ см, $h = 6$ см, $\varepsilon = 0,003$ рад) и для $K = -1,2$ ($a = 3,5$ см, $c = 3$ см, $b = 7$ см, $h = 6$ см, $\varepsilon = 0,003$ рад), учитывая основное условие (3), можно получить 2 ряда составляющих ошибок, которые представлены на рис.3 в виде диаграммы.

В первом ряду диаграммы, представлены результаты расчёта подвески, имеющий коэффициент механической компенсации $K_m \approx -2$, во втором ряду представлены результаты, для $K_m \approx -1,2$. Расчёты выполнены с учётом влияния

ошибок линейных размеров подвески $\Delta = 0.2\text{мм.}$, термического изменения показателя преломления жидкости $\Delta n_t = 5 \cdot 10^{-4}$, и угла наклона $\varepsilon = \pm 10'$.

Найдя полный дифференциал, как сумму частных составляющих ошибок, получим для 1-ого ряда $\Delta K_m = 6.9''$, для 2-ого ряда $\Delta K_m = 4,1''$.

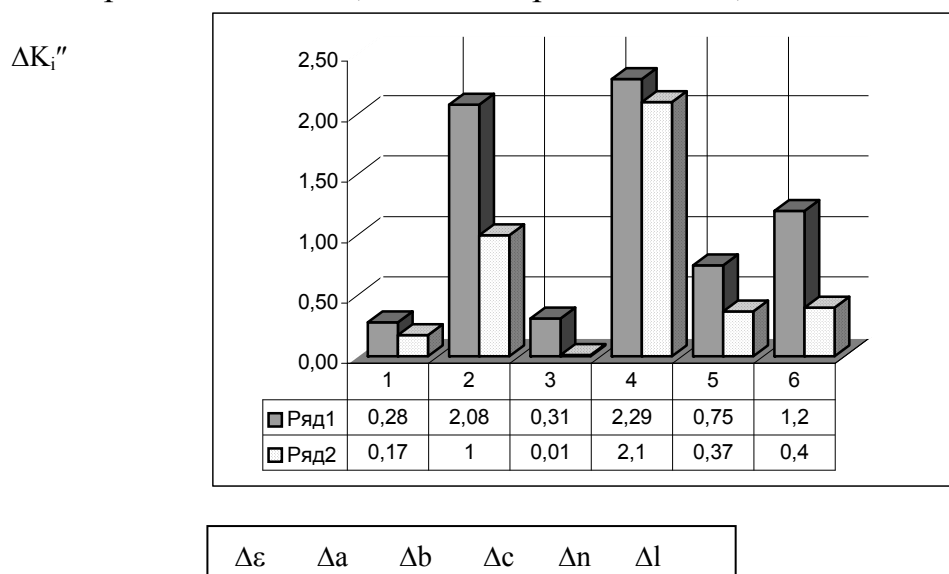


Рисунок 3 – Диаграмма ряда составляющих ошибок

Выводы

Теоретические исследования жидкостного компенсатора подвесного типа, позволили сделать следующие выводы:

1. Для подвесного сосуда полученная формула (11) в отличие от (7) выражает более строгую и точную зависимость коэффициента механической компенсации и геометрических параметров подвески. Она справедлива для разных систем подвеса ($a > c, a < c, a \approx c$), в том числе и для случая, когда $a = 0$.

2. Показано, что при правильном расположении Ц.Т. сосуда с жидкостью и применении в нём сферического основания, перелив жидкости при наклоне прибора не вносит существенной ошибки в стабилизационные характеристики компенсатора, а для $K_m \approx 1.2$ она составляет всего $\Delta\varepsilon = 0.17''$ при наклоне корпуса прибора на $\pm 10'$.

3. Отмечено, что наиболее существенными факторами влияющими на стабилизационные характеристики компенсатора, являются ошибки в установке длины базы a и базы c , а также смещение Ц.Т. $\pm L$ относительно базы c . В среднем ошибка стабилизации от этих параметров в процентном отношении к другим может составить 50-70%.

4. Показано, что для коррекции коэффициента механической компенсации K_m удобнее использовать жёсткую базу a , которая располагается в верхней части корпуса прибора и доступ к ней более упрощён. Наиболее эффективным для коррекции коэффициента K_m , может служить смещение Ц.Т. ($\pm L$) относительно базы c . Её эффективность определяется не только степенью влияния его на ко-

эффицент K_m , но и возможностью создания более простого и высокоточного корректирующего механизма. Устройство корректировки может быть выполнено в виде кольца-ползунка, имеющего возможность перемещаться вдоль стенок сосуда относительно базы c . В подобной конструкции легко автоматизировать и процедуру корректировки положения кольца в зависимости от температуры окружающей среды.

Полученные в статье теоретические результаты могут быть использованы не только для исследования ошибок в стабилизаторах рассматриваемого типа, они могут быть полезны при проектировании приборов, имеющих подобные компенсаторы. Полученные формулы позволят также в дальнейшем выявить функциональную взаимосвязь изменения длины базы a , положения Ц.Т. ($\pm L$) с показателем преломления оптической жидкости n , который, в свою очередь, зависит от температуры окружающей среды. Полученная связь позволит определить пределы смещения кольца-ползунка, относительно базы c и точек подвеса относительно друг друга, в рабочем диапазоне температур. На основании полученных результатов будет разработан механизм, как ручной, так и автоматической корректировки параметров a , и L в зависимости от смены температуры окружающей среды.

Литература

1. Гераімчук М.Д, Сафарян В.А. Стабілізатор вертикального напрямку візирної лінії. Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2004. – Вип. 28. – С.124–128.
2. Кочетов Ф.Г. Нивелиры с компенсаторами. – М.: Недра.– 1985. –248 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Ч.3. – С.11-15. – М.: Наука, 1971.

Сафарян В.А., Гераимчук М.Д. **Теоретические аспекты стабилизации визирной линии жидкостным компенсатором подвешенного типа**

Статья посвящена теоретическим аспектам стабилизации визирной, (лазерной) линии жидкостным компенсатором подвешенного типа, который был использован в приборе вертикального проектирования координат точек ЛаСК-1. Получены основные рабочие формулы для данного типа стабилизатора, исследованы основные, составляющие ошибки компенсации.

Safarian V., Geraimchuk M. **Research of mistakes of indemnification in the liquid stabilizer of pendant type**

Clause is devoted to theoretical aspects of stabilization laser line by the liquid stabilizer of pendant type which has been used in the device of vertical designing coordinates of points LaCK-1. The basic working formulas for the given type stabilizer are received, the basic, making mistakes of indemnification are investigated.

Надійшло до редакції
20 лютого 2006 року