

УДК 53.082

## МЕТОД СНИЖЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С КАРДАННЫМИ РАМКАМИ

*Е. А. Пономарева, асс.*

**Ключевые слова:** погрешность, инклинометрический преобразователь, полный факторный эксперимент, алгоритмическая компенсация, вариации напряжения питания

**Постановка проблемы.** При работе первичных преобразователей инклинометра в автономном режиме питание электронной схемы производится от аккумуляторов или батарей, ЭДС которых с течением времени или других причин падает. Кроме того, в глубоких скважинах на работу как источника питания, так и всего датчика оказывает существенное влияние температура окружающей среды. Все это вносит дополнительные погрешности при измерении параметров искривления скважины [6 – 8].

**Анализ публикаций.** Исследованию погрешностей инклинометрических преобразователей посвящено много публикаций [1; 5 – 7; 9; 10]. Как правило, погрешности рассматриваются обособленно друг от друга, что сказывается на точности измерения углов ориентации.

**Цель статьи.** Предлагается на основании предварительных экспериментальных исследований определять параметры влияния нестабильности напряжения питания на показания преобразователя совместно с вариацией температуры окружающей среды с целью алгоритмической компенсации в процессе измерений.

**Основной материал.** Поскольку в реальных условиях температура и напряжение питания меняются одновременно и, трудно определить как влияние каждого дестабилизирующего фактора на точность измерений независимо друг от друга, так и их коррелирующее воздействие, для построения экспериментальной модели использовался аппарат теории планирования эксперимента [3; 4].

Будем рассматривать аппроксимирующую функцию в виде:

$$\Delta\chi_{\delta} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{n-1}nx_{n-1}x_n + \dots + b_{nn}x_n^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $n$  – число факторов,  $b$  – коэффициенты степенного ряда.

Как показали проведенные исследования и данные, приведенные в работе [2], функция дополнительной погрешности инклинометрического преобразователя имеет линейный характер, поэтому в степенном ряде (1) ограничимся составляющими первого порядка, а также членом взаимного влияния одного фактора на другой. Исходя из вышеизложенного, аппроксимирующий полином запишем в виде:

$$\Delta\chi_{\delta} = b_0 + b_1T + b_2U + b_{12}UT, \quad (2)$$

где  $b_{12}$  – коэффициент, определяющий эффект взаимодействия факторов температуры и напряжения питания.

Эксперимент проводился при интервалах варьирования температуры  $40^{\circ}\text{C}$ , напряжения питания  $\pm 2\text{В}$ , при этом верхний уровень измерения температуры и напряжения питания  $T_{\max} = +100^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\max} = \pm 15\text{В}$ , а нижний уровень – соответственно  $T_{\min} = +20^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{\min} = \pm 1\text{В}$ .

Для удобства определения коэффициентов ряда (2) проводилась операция кодирования факторов в точку с координатами  $x_c$ :  $x_{ic} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2}$ , где  $x_i$  – значение фактора  $T, U$ .

При этом каждому фактору в новом масштабе соответствует его кодированное значение так, что  $x_{i\max} = +1$ ;  $x_{i\min} = -1$ .

Кодированное значение фактора связано с истинным значением следующим соотношением:

$$x_i = \frac{x_i - x_{ic}}{x_{ic} - x_{i\min}} = \frac{x_i - x_{ic}}{x_{i\max} - x_{ic}}, \quad (3)$$

Аппроксимирующий полином (2) с учетом кодированных факторов в матричном виде записывается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta\chi_{\delta 1} \\ \Delta\chi_{\delta 2} \\ \Delta\chi_{\delta 3} \\ \Delta\chi_{\delta 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_{12} \end{bmatrix} \sum_{U=1}^N x_{iU},$$

где  $\sum_{U=1}^N x_{iU}$  – матрица планирования,  $N$  – количество опытов.

При определении сочетания факторов использовалось ортогональное планирование, так как факторы, составляющие матрицу планирования, удовлетворяют условию ортогональности  $\sum_{U=1}^N x_{iU} x_{jU} = 0$ .

Поскольку в эксперименте факторы варьировались на двух уровнях (+1, - 1), строился план или полный факторный эксперимент ПФЭ типа  $2^2$  (для двух факторов  $n = 2$ ). Таким образом, число опытов в эксперименте равно  $2^2 = 4$ , и поэтому определялась погрешность при следующих значениях температуры и напряжения питания:

1.  $T = 20^\circ C, U = \pm 11B;$
2.  $T = 20^\circ C, U = \pm 15B;$
3.  $T = 100^\circ C, U = \pm 11B;$
3.  $T = 100^\circ C, U = \pm 15B.$

Представим план ПФЭ  $2^2$  в следующем виде (таб. 1):

Таблица 1

План полного факторного эксперимента

$N$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_{12}$	$\Delta\chi_{\delta}$
<b>1</b>	+1	-1	-1	+1	$\Delta\chi_{\delta 1}$
<b>2</b>	+1	+1	+1	+1	$\Delta\chi_{\delta 2}$
<b>3</b>	+1	-1	+1	-1	$\Delta\chi_{\delta 3}$
<b>4</b>	+1	+1	-1	-1	$\Delta\chi_{\delta 4}$

Определение коэффициентов ряда (2) сводится к выражению:

$$b_i = \frac{\sum_{U=1}^N x_{iU} \Delta\chi_{\delta U}}{N},$$

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N \Delta\chi_{\delta U}}{N},$$

$$b_1 = \frac{\sum_{U=1}^N \Delta\chi_{\delta U} \cdot x_{1U}}{N},$$

$$b_2 = \frac{\sum_{U=1}^N \Delta\chi_{\delta U} \cdot x_{2U}}{N},$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{U=1}^N \Delta\chi_{\delta U} \cdot x_{1U} \cdot x_{2U}}{N}. \tag{4}$$

Таким образом, в результате проведенных исследований определены коэффициенты аппроксимирующего полинома в кодированных факторах. Переход от кодированных значений к истинным осуществляется согласно формуле (3). Полученные результаты позволяют сделать вывод о степени влияния каждого фактора в отдельности и их сочетания на функцию отклика (аппроксимирующую функцию).

Согласно представленной выше модели (1 – 4) были проведены экспериментальные исследования феррозондового преобразователя азимута ИП с карданными рамками,

позволившими определить дополнительную погрешность измерений, обусловленную нестабильностью напряжения питания и температурой окружающей среды.

Эксперимент проводился на лабораторной установке, содержащей датчик азимута и электронную схему преобразования, цифровой вольтметр, термошкаф, позволяющий проводить испытания при температурах от 20 до 200°C, источник питания УНИП-5. При испытаниях датчик азимута помещался в термошкаф и соединялся с расположенной там же схемой преобразования. Источник напряжения питания и цифровой вольтметр размещались снаружи.

Эксперимент проводился при интервалах варьирования температуры 40°C, напряжения питания  $\pm 2В$ , при этом верхний уровень измерения температуры и напряжения питания  $T_{\max} = \pm 100^\circ C$ ,  $U_{\max} = \pm 15В$ , а нижний уровень – соответственно  $T_{\min} = \pm 20^\circ C$ ,  $U_{\min} = \pm 1В$ .

Полученные результаты измерений обработаны в соответствии с ГОСТ 8.009-72, а систематические составляющие вместе с матрицей планирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

План полного факторного эксперимента для феррозондового датчика азимута

Составляющие плана		Факторы				Эффект взаимодействия	Отклик	
		T°C	K <sub>од</sub>	U, В	K <sub>од</sub>			
Верхний уровень	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	$\Delta\chi_\theta, рад$	$\mathcal{E}\chi_\theta, рад$
	+	100	+	15	+1			
	Нулевой уровень	0	60	0	13	0		
Нижний уровень	-	20	-	11	-1			
Матрица планирования	1	+1	20	-1	11	-1	$0.174 \cdot 10^{-3}$	$0.174 \cdot 10^{-3}$
	2	+1	100	+1	15	+1	$0.087 \cdot 10^{-3}$	$0.088 \cdot 10^{-3}$
	3	+1	20	-1	15	+1	$0.401 \cdot 10^{-3}$	$0.402 \cdot 10^{-3}$
	4	+1	100	+1	11	-1	$0.785 \cdot 10^{-3}$	$0.784 \cdot 10^{-3}$

Окончательный вид аппроксимирующего полинома в кодированных значениях факторов следующий:

$$\Delta\alpha_d = (0.161 + 0.276x_1 - 0.318x_2 - 0.03x_1x_2)10^{-3}.$$

Переход от кодированных значений к истинным осуществляется согласно формуле (3). При этом член взаимодействия факторов был отброшен ввиду его малости. Тогда аналитическое выражение дополнительной погрешности измерения азимута равно

$$\Delta\alpha_\theta = (1.816 + 0.0068T - 0.159U)10^{-2} \text{ (рад)}.$$

Проверка соответствия полученной модели экспериментальной в первом приближении, проводилась  $\Delta\chi_\theta = \mathcal{E}\chi_\theta$ , где  $\mathcal{E}\chi_\theta = \sum_U b_i x_{iU}$  – результаты проверки приведены в таблице 2.

Кроме этого, для оценки однородности дисперсий применен критерий Кохрена [2; 11], который используется при одинаковом числе повторений каждого опыта.

При этом вычислялась дисперсия каждого опыта

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{iN} - \bar{Y}_N)^2}{R-1},$$

где  $S_i^2$  – дисперсия  $i$ -го опыта,

$R$  – число повторений в каждом опыте,

$Y_{iN}$  – отклик  $i$ -го опыта,

$\bar{Y}_N$  – средний отклик.

Для четырех опытов, приведенных в таблице 4.1, были вычислены следующие дисперсии:

$$S_1^2 = 2.17 \cdot 10^{-7}, S_2^2 = 1.33 \cdot 10^{-7}, S_3^2 = 3.22 \cdot 10^{-7}, S_4^2 = 2.21 \cdot 10^{-7}.$$

Затем была найдена величина  $G = S_{i_{\max}}^2 / \sum_{i=1}^N S_i^2 = 0.32$ . Табличное значение  $G_{\text{таб}}$  при принятой доверительной вероятности  $P = 0.95$  и степенях свободы  $f_i = N - 1 = 3$ ,  $f = N = 4$ ,  $G_{\text{таб}} = 0.68$ , т. е.  $G < G_{\text{таб}}$ , что подтверждает однородность дисперсий опытов.

Далее проверялась адекватность полученной модели с помощью критерия Фишера путем сравнения дисперсий адекватности и воспроизводимости  $S_y^2$ .

$$S_{ad}^2 = \frac{R \sum_{i=1}^N (\Delta\alpha_i - \bar{\Delta\alpha})^2}{f_{ad}} = 3.0 \cdot 10^{-9}, \quad S_y^2 = \sum_{i=1}^N \frac{S_i^2}{N} = 2.48 \cdot 10^{-7}.$$

Сравнивая  $F = S_{ad}^2 / S_y^2 = 1.2 \cdot 10^{-2}$  с табличным значением критерия Фишера при  $P = 0.95$ , можно видеть, что  $F = 1.2 \cdot 10^{-2} < F_{\text{таб}} = 4.1$ .

Таким образом, можно сделать вывод, что представленная модель (1 – 4) адекватна экспериментальным данным. Функции погрешности от температуры при различных значениях напряжения питания приведены на рисунке 1.

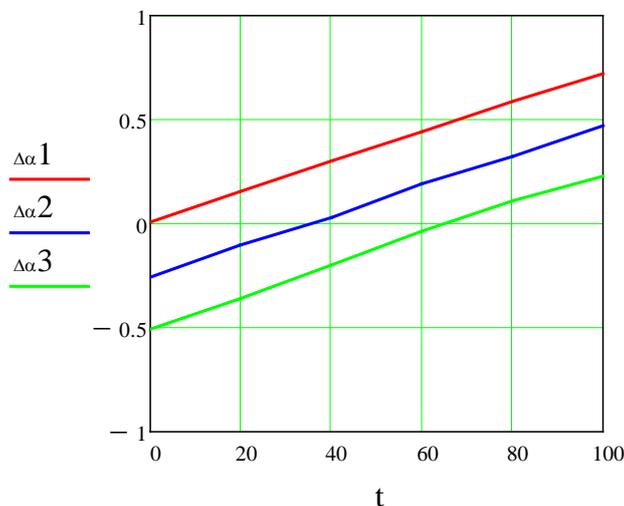


Рис. График зависимости дополнительной погрешности в азимуте от температуры окружающей среды

**Выводы.** Предложена модель ИП с карданными рамками, которая отличается тем, что с использованием методов планирования эксперимента и регрессионного анализа определяет степень корреляционной связи между напряжением питания и температурой в скважине, что позволяет повысить эффективность измерения параметров искривления скважины в 2 раза за счет предварительной коррекции погрешности, обусловленной перечисленными факторами.

Исследованы дополнительные погрешности ИП с карданными рамками от совместного влияния нестабильности напряжения питания и температуры в скважине. Предварительное определение погрешности от перечисленных возмущающих факторов позволяет повысить точность измерения углов ориентации за счет алгоритмической коррекции измерительной информации. Установлено, что погрешность в азимуте разработанного ИП не превышает  $1^{\circ}30'$ , погрешность зенитного угла не превышает  $20'$  при угле наклона  $\theta > 3^{\circ}$ , дополнительная погрешность от изменения температуры на  $100^{\circ}\text{C}$  равна  $0,14^{\circ}$ , от изменения напряжения питания на  $\pm 2V - \pm 0,09^{\circ}$ .

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Геофизическая аппаратура: [сб. науч. ст. / научн. ред. А. В. Матвеев и др.] – Ленинград : Недра, 1980. – 224 с.
2. Громыко Г. Л. Общая теория статистики / Г. Л. Громыко. – М. : ИНФРА, 1999. – 139 с.

3. Зверев А. Е. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код / А. Е. Зверев, В. П. Максимов. – Л. : Энергия, 1974. – 180 с.
4. Ивобатенко Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике / Б. А. Ивобатенко, Н. В. Ильинский. – М. : Недра, 1975. – 184 с.
5. Исаченко В. Х. Инклинометрия скважин. – М. : Недра, 1987. – 216 с.
6. Ковшов Г. Н. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении / Г. Н. Ковшов, Г. Ю. Коловертнов. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. – 228 с.
7. Миловзоров Г. В. Инклинометрические преобразователи на основе феррозондов и одностепенных маятников для автоматизированных систем управления бурением наклонно-направленных скважин: дисс. ... канд. тех. Наук : 05.13.05 / Миловзоров Георгий Владимирович. – Уфа, 1985. – 282 с.
8. Метод определения параметров искривления скважины: (тези доп. X Міжнар. конф. «Контроль і управління в складних системах – 2010» [Електронний ресурс] / О. А. Пономарьова, Г. М. Ковшов, О. В. Садовникова // Перспективні методи і технічні засоби систем контролю і управління. – Вінниця, 2010. – С. 90. – Режим доступу: [http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/ukr/abstracts\\_UA.html](http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2010/ukr/abstracts_UA.html).
9. Рогатых Н. П. Построение датчиков ориентации подвижных объектов / Н. П. Рогатых // Датчики и системы. – 2003. – № 2. – С. 15 – 18.
10. Слива Е. С. Коррекция характеристик первичных преобразователей по температуре / Е. С. Слива // Вестник СГАУ. Сб. : Проблемы и перспективы развития двигателестроения. – Самара, 1998. – Ч. 2. – С. 25 – 29.
11. Теория статистики / [Г. И. Мостовий, А. О. Дегтяр, В. К. Горкавий, В. В. Ярова]. – Х. : Вид-во ХарPI УАДУ «Магістр», 2002. – 300 с.

УДК 697.245

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ГАЗОВОГО ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ

*Л. В. Солод, к. т. н.*

**Ключевые слова:** *газовое лучистое отопление, проектирование, интенсивность теплового облучения, расчет инфракрасных трубчатых газовых обогревателей, температура излучающей поверхности*

**Постановка проблемы.** В настоящее время различные приборы и системы лучистого (инфракрасного) отопления получают все большее распространение. Это объясняется их высокими энергосберегающими характеристиками. Как известно, снижение температуры внутри отапливаемого помещения сокращает расход топлива, а основная особенность лучистого отопления состоит в том, что оно позволяет поддерживать более низкую температуру внутреннего воздуха по сравнению с нормируемой [5], при соблюдении комфортных условий в отапливаемых помещениях. Кроме того, при лучистом отоплении значительно уменьшается перепад температур по высоте помещения, имеется возможность организации зонного (локального) обогрева, регулирования температурного режима в помещении. Все эти преимущества имеют особое значение при отоплении больших помещений промышленного или сельскохозяйственного назначения (цехи, склады, ангары, теплицы, фермы), открытых или полуоткрытых площадок (стадионы). С экономической точки зрения для таких потребителей более выгодно газовое лучистое отопление из-за высокой стоимости электроэнергетики.

В связи с расширением спроса на системы газового лучистого отопления возникает потребность в проектировании таких систем. Состав проекта системы лучистого отопления существенно отличается от проектов отопления с использованием жидкого теплоносителя. Они не содержат проектов котельных и тепловых пунктов, гидравлического расчета системы с целью определения диаметров трубопроводов, подбора насосов и др. оборудования (поскольку отсутствует необходимость организации циркуляции жидкого теплоносителя), значительно сокращается раздел автоматизации, так как инфракрасные обогреватели поставляются в высокой степени готовности, включая блок автоматики.

В то же время в проекты лучистых систем отопления добавляется: