

УДК 622.1:528.063.9

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРЕДРАСЧЕТА ТОЧНОСТІ СБОЙКИ ГОРНИХ ВИРАБОТОК

Могильный С. Г., Шоломицкий А. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

В статті розглянута теорія строгого передрозрахунку точності збійки гірничих виробок, які проходять зустрічними забоями. Показано технологію автоматизованого проектування маркшейдерських мереж і передрозрахунку точності збійки.

In this paper we consider the theory of strict accuracy estimation of the mine workings connection, which are located on opposite faces. In the article men shows the computer-aided design technology of the underground survey networks and evaluates the accuracy of the connection.

Маркшейдерское обеспечение проходки выработок встречными забоями является одной из ответственных и сложных задач маркшейдера. В соответствии с «Инструкция ...» [1] маркшейдеру необходимо предварительно рассмотреть возможные варианты построения подземной сети для обеспечения сбойки забоев в заданном месте, предрасчитать точность сбойки в разных вариантах схемы сети и точности измерений. Теория выполнения этих работ хорошо разработана и описана в классических учебниках [2]. В «Инструкция...» подробно описана методика выполнения предрасчета графо-аналитическим методом. Выполнение предрасчета требует значительных затрат времени на графические построения и измерения, а также на аналитические расчеты. Кроме того, методика инструкции не позволяет учесть особенности построения сети и строго учесть возможные дополнительные измерения, например, гиростороны. Немногие исследования этой те-

матики последних лет не решили эту проблему [6]. Поэтому задача использования современных ЭВМ при решении этой важной задачи является актуальной и имеет большое практическое значение для производства.

В работе авторов [3] дано описание созданного ими программного комплекса «МГСети», который обеспечивает строгое уравнивание подземных маркшейдерских сетей любого размера и сложности. Там же указано на возможность строгого автоматизированного предрасчета точности сбойки. Ограниченность размера публикации [3] не позволяла уделить должного внимания этим возможностям комплекса «МГСети».

Выполнение предрасчета точности сбойки встречных забоев, как это предусматривает «Инструкция...» [1] производится в следующей последовательности:

- на план горных выработок наносится положение проектируемых выработок;
- наносятся пункты существующих маркшейдерских сетей и проектные положения точек ходов, обеспечивающих задание направлений проходки выработок;
- графически в условной системе координат, ориентированной по направлению сбойки, измеряют на плане векторы влияния погрешностей углов для предполагаемой точки встречи забоев, длины и дирекционные углы сторон ходов;
- по формулам для принятой точности угловых и линейных измерений вычисляют средние квадратические ошибки координат точки встречи забоев.

Каждый из приведенных этапов предполагает использование различных носителей информации, ручного измерения, заполнения ведомостей и вычислений на калькуляторе. Возможности комплекса «МГСети» [3] позволяют все это выполнить на мониторе компьютера без ручных промежуточных записей с высоким уровнем автоматизации. Рассмотрим последовательность и содержание работ.

В программном комплексе «МГСети» создается новый проект, в который рекомендуется загрузить часть маркшейдерской подземной сети, расположенной на участке проектируемой сбойки. Участок маркшейдерского плана, на котором нанесено про-

ектное положение выработок, сканируется и помещается в графическое окно основной формы программы «МГСети» (рис. 1 справа).

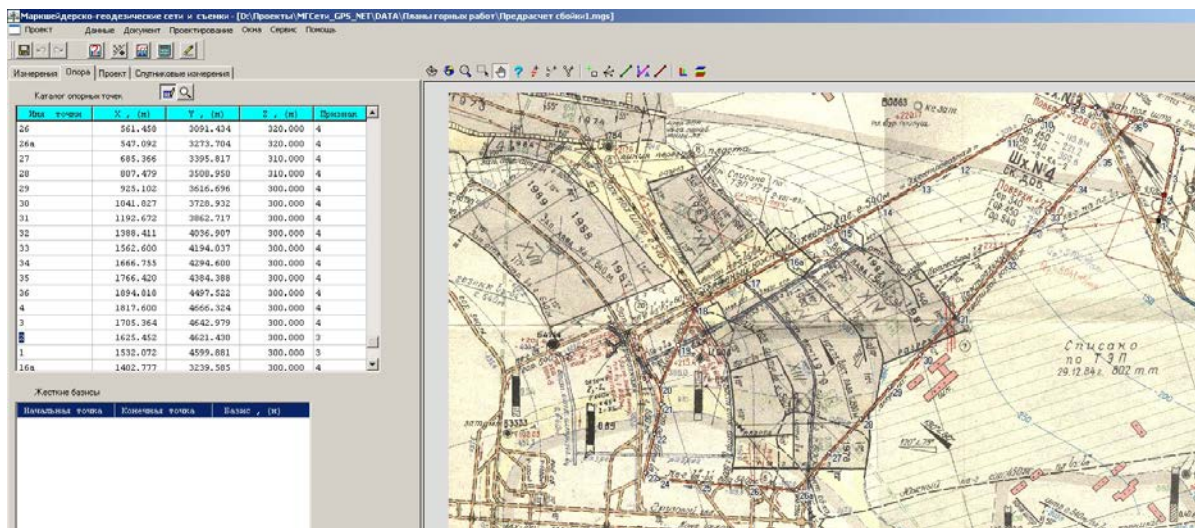



Рис. 1. План горных работ в программе «МГСети»

Не требуется очень высокой точности растрового изображения, достаточно, чтобы оно позволяло обеспечивать точность определения координат точек в пределах ± 1 мм в масштабе плана, поэтому сканирование плана можно выполнять обычным офисным сканером или цифровым фотоаппаратом. Растр ориентируется в системе координат маркшейдерской сети. В этом случае пункты подземной маркшейдерской сети автоматически ложатся на изображения выработок на растре. На рис. 1 стороны сети выделены красными линиями, а пункты кружочками. Если убрать видимость растра плана, то получим наглядную схему существующей опорной маркшейдерской сети (рис. 2), которая опирается на точку 2 с исходными координатами и гиросторону 3–4.

Дальнейшее проектирование сети выполняется с помощью инструментов программы, заданных на инструментальной панели кнопок с пиктограммами (рис. 2). Подробное описание функций кнопок дано в документации к программному комплексу «МГСети» [4], здесь же дадим краткое пояснение порядка их применения.

С помощью кнопки  на оси выработки размещаются проектные положения точек сети: номера с 8 по 19. Программа автоматически определяет их координаты и вносит в закладку <Опора> (рис. 1).

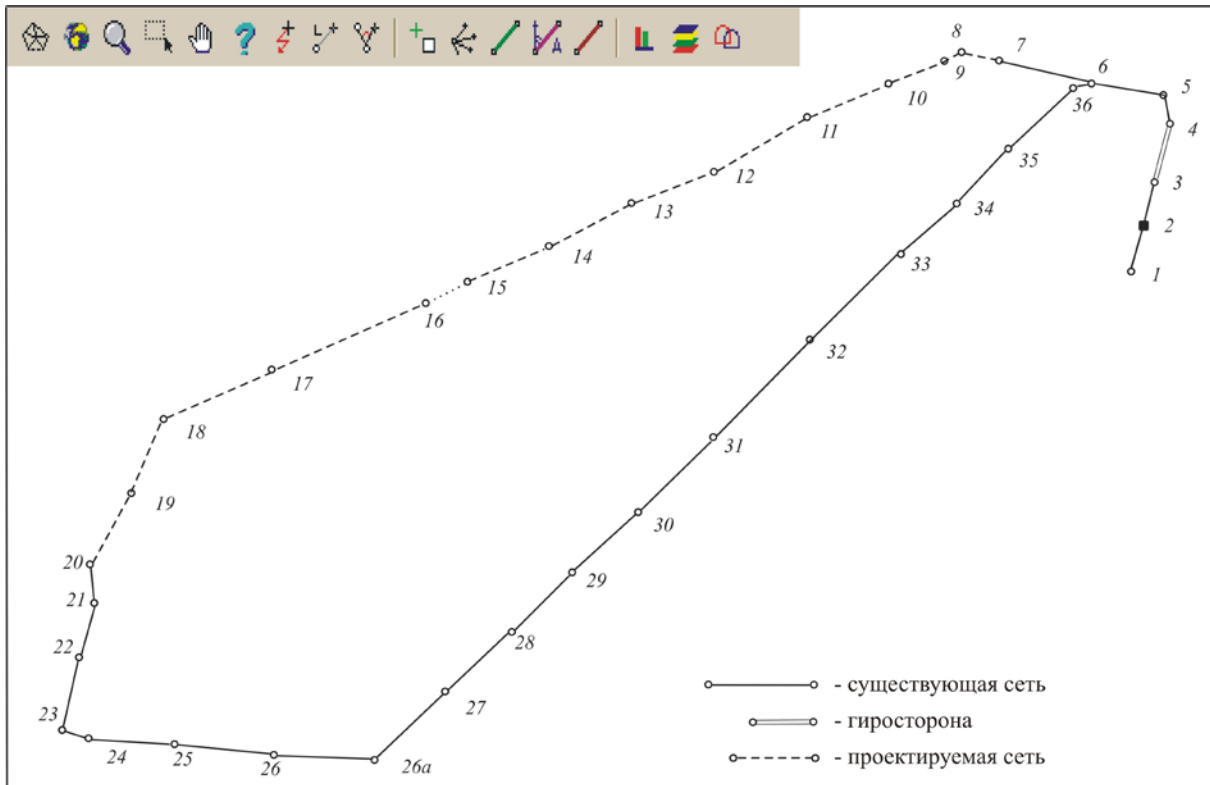



Рис. 2. Существующая и проектная сети

Для ввода углов и длин между проектными пунктами используется кнопка . При ее включении необходимо курсором выбрать нужный пункт и задать направления на станции, которые будут отображаться на экране «резиновой нитью». Программа автоматически определяет длины и направления и формирует в закладке «Измерения» данные для станции. На интервале линии 15 – 16 предполагается точка сбойки, поэтому измерения на концах этой линии не планируются (рис. 2).

В результате формируется сеть, для которой выполняется операция предрасчета точности сети, и получается полная характеристика точности всех ее элементов. В соответствии с теорией уравнивания методом наименьших квадратов [5] для предрасчета

точности сети составляются параметрические уравнения поправок.

Параметрическое уравнение направления $k-i$ между пунктами k и i имеет вид:

$$v_{ki} = -\delta z_k + a_{ki}\delta x_k + b_{ki}\delta y_k - a_{ki}\delta x_i - b_{ki}\delta y_i + l_{ki}, \quad (1)$$

где v_{ki} – поправка в направление N_{ki} ;

$\delta x_i, \delta y_i, \delta x_k, \delta y_k$ – поправки в координаты пунктов;

δz_k – поправка в ориентирный угол;

a_{ki}, b_{ki} – коэффициенты при поправках в координаты вычисляются по следующим формулам

$$\left. \begin{aligned} a_{ki} &= \frac{\rho'' \sin \alpha_{ki}^{(0)}}{s_{ki}^{(0)}}; \\ b_{ki} &= \frac{\rho'' \cos \alpha_{ki}^{(0)}}{s_{ki}^{(0)}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

причем $\alpha_{ki}^{(0)}, s_{ki}^{(0)}$ – приближенные значения дирекционного угла и длины стороны $k-i$, вычисленные по координатам $x_i^{(0)}, y_i^{(0)}, x_k^{(0)}, y_k^{(0)}$ пунктов, измеренным по растру плана; $\rho'' = 206265''$.

Параметрическое уравнение длины линии будет иметь вид

$$v_{ki}^s = -\cos \alpha_{ki}^{(0)} \delta x_k - \sin \alpha_{ki}^{(0)} \delta y_k + \cos \alpha_{ki}^{(0)} \delta x_i + \sin \alpha_{ki}^{(0)} \delta y_i + l_{ki}^s, \quad (3)$$

где v_{ki}^s – поправка в длину s_{ki} .

Параметрическое уравнение поправок дирекционных углов гиросторон будет иметь вид

$$v_{ki}^\alpha = a_{ki}\delta x_k + b_{ki}\delta y_k - a_{ki}\delta x_i - b_{ki}\delta y_i + l_{ki}^\alpha, \quad (4)$$

где v_{ki}^α – поправка в α_{ki} – измеренный дирекционный угол.

Уравнения (1) – (3) решают совместно методом наименьших квадратов при выполнении условия

$$\left[p_\beta v v + p_s v^s v^s + p_\alpha v^\alpha v^\alpha \right] = \min, \quad (5)$$

где P_β, P_s, P_α – веса измерений, соответственно направлений, длин и дирекционных углов.

Для вычисления весов измерений используются параметры точности заданные в закладке <Проект> (рис. 3).

В качестве единицы веса принимается средняя квадратическая ошибка измерения направления горизонтальных углов, а точность измерения длин в мм оценивается по формуле $m_s = a + b * \sqrt{l_{км}}$. Для данных на рис. 3 эта формула будет иметь вид $m_s = 20 + 50 * \sqrt{l_{км}}$.

The screenshot shows a software window titled 'Измерения | Опора | Проект | Спутниковые измерения'. The 'Проект' tab is active. The form contains the following fields:

- Объект: Предрасчет сбойки
- Дата съемки: 18.11.2010
- Исполнитель: Иванов С.В.
- Инструмент: 2Т5к
- $m_\alpha = 10$ С.К.О. измерения горизонтального угла (")
- $m_\beta = 20$ С.К.О. измерения вертикального угла (")
- $m_d = 20$ С.К.О. измерения длины (мм) 50 ppm (мм/км)
- $m_i = 3$ С.К.О. измерения высоты инструмента (мм)
- $m_v = 3$ С.К.О. измерения высоты визирования (мм)
- $\mu_{1/2} = 10.58383$ ошибка единицы веса превышения
- Файл проекта: D:\LAUFARBT\СтатьиМогильного\Предрасчет сбойки\Предрасчет сбойкиМ

Рис. 3. Параметры проекта

Общую систему параметрических уравнений поправок можно представить в следующем виде

$$\mathbf{A}\Delta + \mathbf{L} = \mathbf{V}, \quad (6)$$

где \mathbf{A} – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок в измерения; \mathbf{L}, \mathbf{V} – векторы свободных членов и поправок.

Поскольку выполняется предрасчет сети по предполагаемым величинам измеряемых величин, то свободные члены в параметрических уравнениях не вычисляются.

В соответствии с теорией способа наименьших квадратов для выполнения условия

$$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} = \min, \quad (7)$$

где \mathbf{P} – диагональная матрица весов, значения вектора Δ поправок параметров должны вычисляться по формуле:

$$\Delta = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}, \quad (8)$$

т.е. из решения нормальных уравнений

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \Delta + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} = \mathbf{0} \quad (9)$$

Для оценки точности элементов сети в соответствии с теорией [5] вычисляется \mathbf{Q} матрица весовых коэффициентов по формуле


$$\mathbf{Q} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1}. \quad (10)$$

Тогда m_{x_i} и m_{y_i} точность координат i -го пункта определится из выражений

$$\left. \begin{aligned} m_{x_i} &= m_\beta \sqrt{Q_{x_i, x_i}} \\ m_{y_i} &= m_\beta \sqrt{Q_{y_i, y_i}} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где $Q_{x_i, x_i}, Q_{y_i, y_i}$ – диагональные элементы матрицы \mathbf{Q} , соответствующие координатам пункта i .

Графическое представление распределения линейных ошибок координат пунктов показано на рис. 4. Величины погрешностей изображены в относительной мере вертикальными красными отрезками (столбиковая диаграмма).

Имея матрицу \mathbf{Q} весовых коэффициентов, можно вычислить точность определения взаимного положения любой пары пунктов сети. Для этого следует использовать кнопку  (рис. 4) и, следуя указаниям интерфейса, выбрать курсором требуемые два пункта. Результаты вычислений будут представлены в окне на экране (рис. 5) и сохранены в отдельном файле.

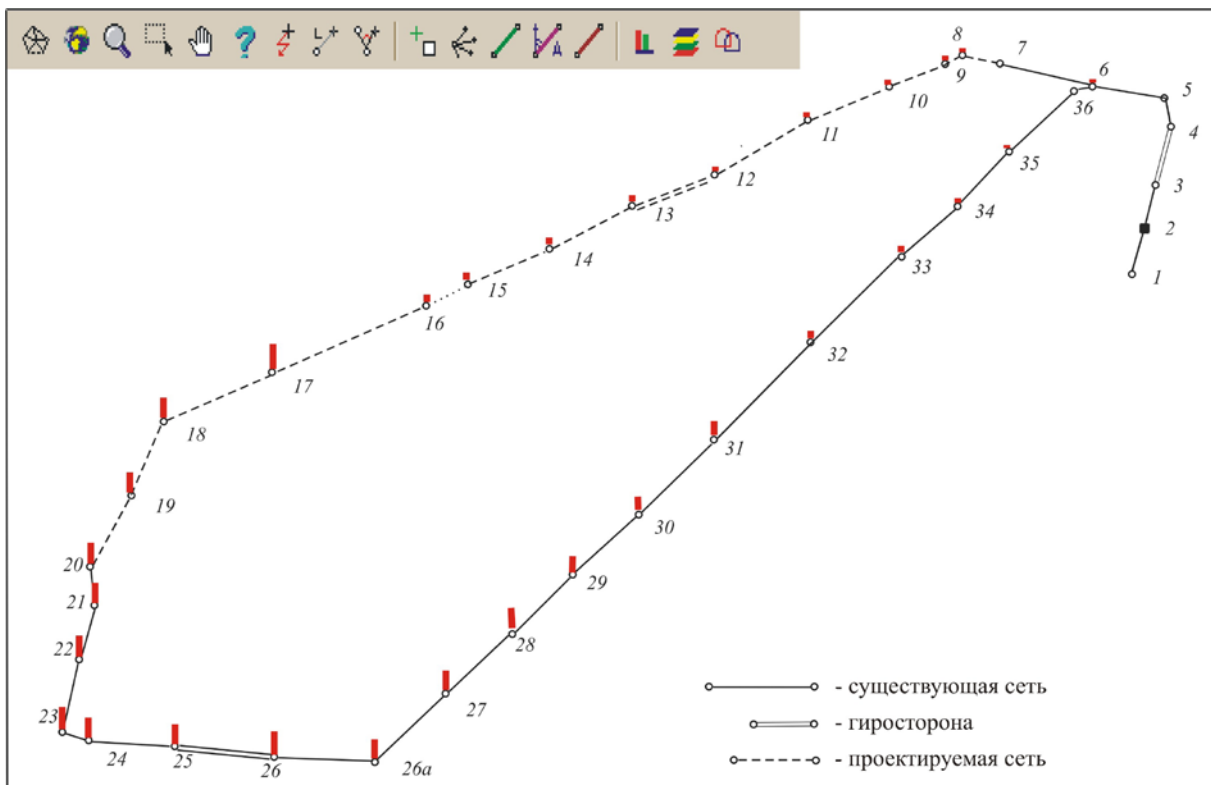


Рис. 4. Диаграмма распределения линейных ошибок

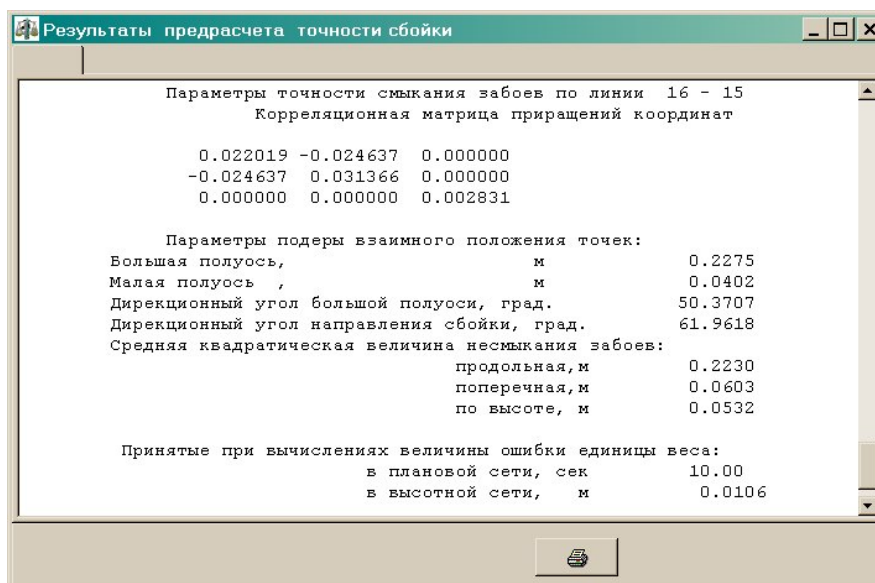


Рис. 5. Результаты предрасчета точности сбойки

Вычисление точности выполняется строго методом наименьших квадратов [5]. Из матрицы Q , формула (10), выбираются весовые коэффициенты, соответствующие координатам

заданных пунктов i и j , и образуется корреляционная матрица \mathbf{K} их погрешностей в виде

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} Q_{x_i, x_i} & Q_{x_i, y_i} & Q_{x_i, x_k} & Q_{x_i, y_k} \\ Q_{x_i, y_i} & Q_{y_i, y_i} & Q_{y_i, x_k} & Q_{y_i, y_k} \\ Q_{x_i, x_k} & Q_{y_i, x_k} & Q_{x_k, x_k} & Q_{x_k, y_k} \\ Q_{x_i, y_k} & Q_{y_i, y_k} & Q_{x_k, y_k} & Q_{y_k, y_k} \end{vmatrix} \quad (12)$$

Недиагональные элементы матрицы \mathbf{K} учитывают корреляционную зависимость погрешностей координат, которая вызвана совместным использованием при уравнивании измеряемых величин. Ковариационная матрица \mathbf{M} приращений координат взаимного положения пары пунктов вычисляется по следующим формулам

$$\mathbf{M} = m_{\beta}^2 \begin{vmatrix} m_{\Delta x}^2 & m_{\Delta x, \Delta y} \\ m_{\Delta x, \Delta y} & m_{\Delta y}^2 \end{vmatrix} = m_{\beta}^2 \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \mathbf{K} \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (13)$$

Матрица \mathbf{M} дает полную характеристику распределения погрешностей взаимного положения пунктов i и j и позволяет вычислить элементы подеры по следующим формулам.

Дирекционный угол Θ направления большой полуоси:

$$\Theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{-2m_{\Delta x, \Delta y}}{m_{\Delta x}^2 - m_{\Delta y}^2} \right), \quad (14)$$

Величины A – большой и B – малой главных полуосей из выражений:

$$\left. \begin{aligned} A^2 &= m_{\Delta x}^2 \cos^2 \Theta + m_{\Delta y}^2 \sin^2 \Theta - 2m_{\Delta x, \Delta y} \cos \Theta \sin \Theta; \\ B^2 &= m_{\Delta x}^2 \sin^2 \Theta + m_{\Delta y}^2 \cos^2 \Theta + 2m_{\Delta x, \Delta y} \cos \Theta \sin \Theta \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Если направление сбойки имеет дирекционный угол равный α , то m_u – продольная и m_v – поперечная ошибки вычисляются по формулам

$$\left. \begin{aligned} m_u^2 &= A^2 \cos^2(\alpha - \Theta) + B^2 \sin^2(\alpha - \Theta); \\ m_v^2 &= A^2 \cos^2(\alpha + \pi/2 - \Theta) + B^2 \sin^2(\alpha + \pi/2 - \Theta) \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

На рис. 6 графічно показано розподілення погрешностей координат по даним рис. 5.

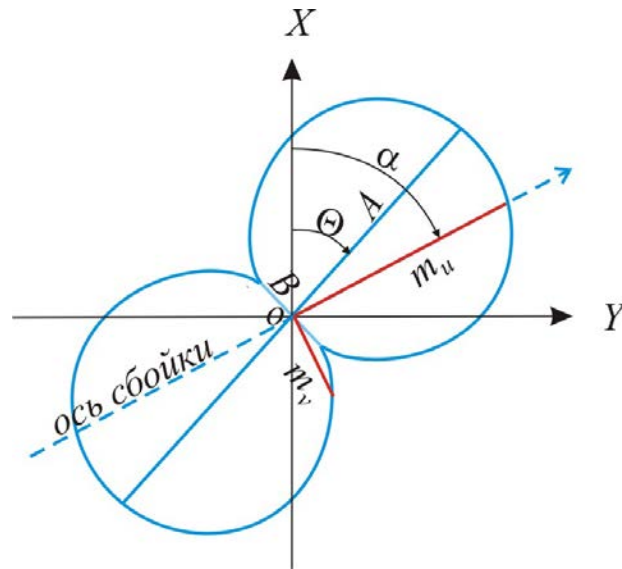


Рис. 6. Погрешности координат сбойки

Если сбойка выполняется между двумя шахтами, которые не связаны общей подземной сетью, то методика предрасчета точности сбойки не изменяется, поскольку комплекс «МГСети» позволяет в одном проекте обрабатывать несколько отдельных сетей. Главное, чтобы они вычислялись в одной системе координат. Для учета влияния погрешностей наземной сети, связывающей подходы пункты шахт, необходимо по приведенной методике вычислить для них ковариационную матрицу, аналогичную (13), и просуммировать ее с матрицей **M** для подземной сети. Дальнейшие вычисления подеры, продольной и поперечной погрешностей сбойки выполняется по формулам (14) – (16).

Рассмотренная методика предрасчета ошибки сбойки обеспечивает высокий уровень автоматизации вычислений, является теоретически строгой и учитывает конфигурацию сети любой сложности. Она соответствует требованиям «Инструкция...» [1] и

может быть рекомендована маркшейдерам для практического использования.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Маркшейдерські роботи на вугільних шахтах та розрізах: Інструкція / Редкоміс.: М.Є. Капланець (голова) та ін. – Вид. офіц. – Донецьк: ТОВ "АЛАН", 2001. – 264 с.
2. Маркшейдерское дело. Учебник для вузов. / Д.Н. Оглоблин, Г.И. Герасименко, А.Г. Акимов и др. – 3-е изд. перераб. и доп. М., «Недра», 1981. – 704 с.
3. Могильный С.Г., Шоломицкий А.А. Программный комплекс для подземных маркшейдерских сетей. Уголь Украины. – 2011. – № 5. – С. 17 – 22.
4. http://gis.dgtu.donetsk.ua/newsiteversion/ru/mgsetifiles/mgseti_manual_ru.pdf – Документация программного комплекса «МГСети» (Электронный ресурс).
5. Папазов М.Г., Могильный С.Г. Теория ошибок и способ наименьших квадратов. – М.: Недра, 1968. – 302 с.
6. Коробков С.А., Голованов В.А. Предрасчёт сбоек горных выработок на основе векторных ошибок. Записки Горного института. Маркшейдерское дело и геодезия, том № 146, Санкт-Петербург, – 2001, – С. 39 – 41.