

УГОЛЬ УКРАИНЫ



90
лет

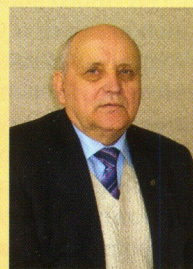
**ДОНЕЦКОМУ НАЦИОНАЛЬНОМУ
ТЕХНИЧЕСКОМУ УНИВЕРСИТЕТУ**

5'**2011**

УДК 622.1:528.063.9

С. Г. МОГИЛЬНЫЙ, А. А. ШОЛОМИЦКИЙ,

доктора техн. наук
(ДонНТУ)



С. Г. Могильный



А. А. Шоломицкий

Программный комплекс для подземных маркшейдерских сетей

Приведены универсальный алгоритм вычисления и уравнивания сетей любой сложности, а также возможности предлагаемого программного комплекса «МГСети»: управление и корректирование данных, оценка точности и поиск грубых ошибок, проектирование и предрасчет точности сетей.

Подземные маркшейдерские сети угольных шахт и рудников являются основой для решения задач проведения горных работ, обеспечения их безопасности и эффективности [1]. Построение и поддержание маркшейдерских сетей требуют значительных затрат труда на вычислительные работы, поэтому первые опыты применения ЭВМ в маркшейдерии были направлены именно на решение проблемы снижения затрат на вычисления и уравнивание маркшейдерских плановых и высотных сетей.

В работах Е. И. Рыхлюка [2 – 4] и А. В. Хлебникова [5, 6] было достигнуто достаточно полное решение задачи уравнивания и оценки точности подземных маркшейдерских сетей для уровня развития ЭВМ того времени. Возможности и доступность вычислительной техники стремительно возрастали, однако широта ее применения в отечественной практике решения маркшейдерских задач сильно отставала. В частности, к задачам уравнивания подземных опорных маркшейдерских сетей обратились лишь спустя почти 25 лет. В работах В. К. Музыкантова [7 – 9] наиболее полно и обоснованно отражено состояние проблемы, сформулированы требования к ее решению и предложены варианты достижения цели. К сожалению, реализация этих предложений не была доведена до конца.

Оценка состояния проблемы уравнивания подземных маркшейдерских сетей, данная В. К. Музыкантовым, справедлива и в настоящее время, поэтому уместно повторить ее основные положения:

на практике сеть шахты пополняется путем обособленного вычисления каждого вновь проложенного хода;

качество измерений в ходе оценивается приближенно, так как для оценки используются только невязки данного хода;

допуски на невязки ходов устанавливаются весьма упрощенно, без учета формы хода, количества пунктов поворота, а наличие гиросторон в ходе является формальным; расчеты строгих допусков на невязки показали, что они, как правило, в 2–4 раза меньше упрощенных допусков, рекомендуемых Инструкцией [1];

раздельное уравнивание обеспечивает лишь геометрическую согласованность элементов сети, не улучшая, а часто ухудшая конечные результаты;

переуравнивание сети выполняется редко, практически через 7–10 лет (при реконструкции сети).

За прошедшие с момента публикации годы положение практически не изменилось, а может быть даже усугубилось. Поэтому важность решения проблем вычисления и уравнивания маркшейдерских подземных сетей сохраняется и имеет не только теоретическое, но и практическое значение.

Кроме того, маркшейдеры до сих пор не располагают соответствующим программным обеспечением для уравнивания подземных сетей, а те программы, которые используются на практике, имеют существенные недостатки: они плохо приспособлены для пополнения и корректировки данных сети; строгий контроль качества ходов запаздывает и его результаты не используются; при совместном уравнивании невыявленные грубые ошибки оказываются скрытыми, так как они перераспределяются на другие участки сети, искажая результаты уравнивания.

Решение поставленной проблемы должно основываться на программном обеспечении, удовлетворяю-

шем требованию максимального использования имеющейся в измерениях информации и учитывающем все возникающие в сети геометрические условия. Это позволит проверять качество измерений, локализовать недопустимые погрешности и получать координаты пунктов сети с высокой точностью и надежностью. В настоящей статье представляется программный комплекс «МГСети», разработанный авторами, который в полной мере отвечает сформулированным требованиям и лишен отмеченных недостатков.

Основные составляющие программного комплекса «МГСети»: алгоритм обработки информации и интерфейс пользователя.

Алгоритм вычисления и уравнивания маркшейдерских сетей. Алгоритм в значительной степени зависит от содержания и структуры исходной информации, которая определяется технологией измерений, а также от фиксации результатов на носителях. В маркшейдерской практике результаты фиксируются вручную в полевом журнале на станции установки теодолита или нивелира. Поэтому исходным элементарным блоком данных в плановых сетях служат результаты измерений на одной станции, которые включают: имя станции, измеренные горизонтальные и вертикальные углы, расстояния и имена конечных точек. Более четкое описание исходных данных дает несколько упрощенная формальная грамматика:

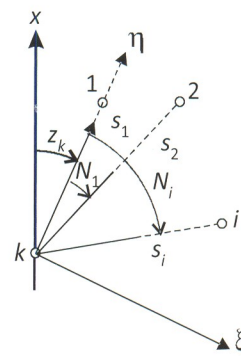
- 1) <сеть>::=<проект>:<опора>{<станция>}₁ⁿ;
- 2) <проект>::=<имя сети, исполнитель, параметры точности измерений>;
- 3) <опора>::=[<координаты исходных пунктов>][<исходные азимуты>][<базисы>];
- 4) <станция>::=<имя станции>[<высота инструмента>]{<сторона>}₁^p;
- 5) <сторона>::=<имя точки визирования>[<высота визирования>]{<измерения>}₁^s;
- 6) <измерения>::=[<горизонтальное направление>][<горизонтальное проложение>][<превышение>][<вес превышения>] или [<горизонтальное направление>][<наклонное расстояние>][<вертикальный угол>].

В соответствии с нотацией Бэкуса элементы, заключенные в [] (квадратные скобки), могут отсутствовать в конкретных случаях, скобки $\{\}_1^k$ обозначают, что элемент, который находится в них, может повторяться от 1 до k раз. Предполагается, что предварительная обработка полевого журнала выполнена и введены необходимые поправки в линейные измерения.

В работах [2 – 6] использовался коррелятный либо комбинированный способ уравнивания, что было оправдано для ЭВМ того времени, сейчас эффективнее использовать параметрический способ, который проще формализуется. Однако для его реализации надо знать приближенные координаты пунктов сети. Для

Рис. 1. Схема полярных засечек на отдельном пункте.

маркшейдерских сетей, имеющих сложную топологию полигонометрических ходов, использование традиционных схем вычисления координат пунктов формализовать непросто. Поэтому авторы воспользовались быстродействием современных ЭВМ.



Для произвольной станции измерений можно составить систему линейных уравнений относительно координат определяемых пунктов, которые связывают измеренные величины. Пусть на пункте k измерены направления на пункты и расстояния до них (рис. 1).

Для каждого луча $k-i$ имеют место следующие два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} x_k + s_i \cos N_i a_k - s_i \sin N_i b_k - x_i &= \varepsilon_{ki}^x; \\ y_k + s_i \sin N_i a_k + s_i \cos N_i b_k - y_i &= \varepsilon_{ki}^y, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x_k, y_k и x_i, y_i – координаты k начальной точки (станции) и i конечной точки (стороны сети);

a_k, b_k — параметры ориентирования направлений станции k ;

s_p, N_i – горизонтальное проложение длины и измеренное направление стороны $k-i$;

 $\varepsilon_{ki}^x, \varepsilon_{ki}^y$ — невязки из-за погрешностей измерений.

По существу формулы (1) выражают переход от системы координат полярных засечек с пункта k к геодезической системе координат. Величины $s_i \cos N_i = \eta_i$ и $s_i \sin N_i = \xi_i$ следует рассматривать как результаты измерений, т. е. как известные величины, а остальные параметры – как неизвестные (см. рис. 1).

Приняв очевидные обозначения матриц в выражении (1), запишем его в виде

$$\mathbf{A}_{ki} \Delta_{ki} + \mathbf{I}_{ki} = \varepsilon_{ki}. \quad (2)$$

В зависимости от того, какие пункты расположены на концах линии $k-i$, будет изменяться содержание матрицы коэффициентов $\mathbf{A}_{ki}$ и вектора свободных членов $\mathbf{I}_{ki}$.

Из уравнений (2) составим общую систему уравнений для всех пунктов сети

$$\mathbf{A}\Delta + \mathbf{L} = \varepsilon, \quad (3)$$

где $\mathbf{A}$ – объединенная матрица параметрических уравнений;
 Δ – вектор приближенных значений неизвестных;

L и ε – векторы соответственно свободных членов и невязок уравнений (1).

Матрица коэффициентов системы уравнений (3) сильно разрежена, поэтому, решая ее методом сопря-

женных градиентов [10] при условии, что $\varepsilon^T \varepsilon = \min$, всегда будет получено однозначное решение.

Поскольку параметры ориентирования по существу являются функциями ориентирного угла z_k (рис. 1), в уравнениях каждой станции значения параметров a_k и b_k должны удовлетворять соотношению

$$a_k^2 + b_k^2 = 1. \quad (4)$$

Условие (4) в уравнениях (3) не учитывается, в связи с этим решение системы уравнений (3) выполняется итерациями. Полученные значения координат не самые надежные, но их точность достаточна для выполнения строгого уравнивания.

Рассмотренный алгоритм вычисления приближенных координат хода полигонометрии пригоден для любой комбинации ходов в сети, он не требует указания последовательности станций при измерении углов и даже при наличии грубых ошибок дает конечные результаты, по которым можно определить место, где находятся ошибочные данные.

В маркшейдерской плановой сети имеют место следующие параметрические уравнения: направлений; длин линий; дирекционных углов. В качестве неизвестных параметров используются координаты определяемых пунктов и ориентирные углы на станциях угловых измерений. Рассмотрим каждое из видов параметрических уравнений.

Параметрическое уравнение направления N_{ki} (рис. 1), измеренного на пункте k на пункт i , имеет известный вид [11]

$$v_{ki} = -\delta z_k + a_{ki} \delta x_k + b_{ki} \delta y_k - a_{ki} \delta x_i - b_{ki} \delta y_i + l_{ki}, \quad (5)$$

где v_{ki} – поправка в измеренное значение направления N_{ki} ; $\delta x_k, \delta y_k, \delta x_i, \delta y_i$ – поправки в приближенные значения координат; δz_k – поправка в приближенное значение ориентирного угла.

Коэффициенты при поправках в координаты вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} a_{ki} &= \rho'' \sin \alpha_{ki}^{(0)} / s_{ki}^{(0)}, \\ b_{ki} &= \rho'' \cos \alpha_{ki}^{(0)} / s_{ki}^{(0)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha_{ki}^{(0)}$ и $s_{ki}^{(0)}$ – приближенные значения дирекционного угла и длины стороны $k-i$; $\rho'' = 206265''$.

Свободный член l_{ki} в формуле (5) определяется из выражения

$$l_{ki} = \arctg[(y_i^{(0)} - y_k^{(0)}) / (x_i^{(0)} - x_k^{(0)})] - z_k^{(0)} - N_{ki}, \quad (7)$$

где $x_k^{(0)}, y_k^{(0)}, x_i^{(0)}, y_i^{(0)}$ – приближенные значения координат; $z_k^{(0)}$ – приближенное значение ориентирного угла.

Уравнение (5) соответствует направлению со вставляемого пункта на вставляемый. Если какой-либо пункт исходный, т. е. жесткий, то соответствующие поправки в координаты должны быть равны нулю, что дости-

гается равенством нулю соответствующих коэффициентов.

Параметрическое уравнение длины линии для уравниваемых величин будет иметь вид

$$v_{ki}^s = -\cos \tilde{\alpha}_{ki}^{(0)} \delta x_k - \sin \tilde{\alpha}_{ki}^{(0)} \delta y_k + \cos \tilde{\alpha}_{ki}^{(0)} \delta x_i + \sin \tilde{\alpha}_{ki}^{(0)} \delta y_i + l_{ki}^s, \quad (8)$$

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

$\tilde{\alpha}_{ki}^{(0)}$ – приближенное значение дирекционного угла линии;

l_{ki}^s – свободный член,

$$l_{ki}^s = \sqrt{(x_i^{(0)} - x_k^{(0)})^2 + (y_i^{(0)} - y_k^{(0)})^2} - s_{ki}.$$

Если один из пунктов исходный, то соответствующие коэффициенты в уравнении (8) полагаются равными нулю.

Параметрическое уравнение поправок дирекционных углов будет иметь вид

$$v_{ki}^a = a_{ki} \delta x_k + b_{ki} \delta y_k - a_{ki} \delta x_i - b_{ki} \delta y_i + l_{ki}^a, \quad (9)$$

где v_{ki}^a – поправка в измеренный дирекционный угол a_{ki} ;

l_{ki}^a – свободный член, вычисляемый по формуле

$$l_{ki}^a = \alpha_{ki}^{(0)} - a_{ki}.$$

Уравнения (5), (8) и (9) решают совместно методом наименьших квадратов при выполнении условия

$$[p_\beta v v + p_s v^s v^s + p_a v^a v^a] = \min, \quad (10)$$

где p_β, p_s и p_a – веса измерений направлений, длин и дирекционных углов.

Общую систему параметрических уравнений поправок можно представить в виде

$$\mathbf{B} \Delta + \mathbf{L} = \mathbf{V}, \quad (11)$$

где $\mathbf{B}$ – матрица коэффициентов параметрических уравнений поправок в измерения;

Δ – вектор поправок в приближенные значения неизвестных;

$\mathbf{L}$ и $\mathbf{V}$ – векторы свободных членов и невязок уравнений (5), (8) и (9).

Использование разреженной структуры матрицы $\mathbf{B}$ и метода сопряженных градиентов для решения системы уравнений (11) при выполнении условия (10) дает по сравнению с прямыми методами решения системы нормальных уравнений следующие преимущества:

нет необходимости в вычислении и хранении в памяти ЭВМ объемной матрицы нормальных уравнений; вычислительные операции выполняются только с величинами, отличными от нуля, что дает значительную экономию процессорного времени ЭВМ;

метод градиентов обеспечивает устойчивость вычислительного процесса, если из-за ошибок в данных сеть оказывается неопределенной. В этом случае при прямом методе решения нормальных уравнений вычисления завершаются аварийно, т. е. без конечных результатов, при методе сопряженных градиентов получаются однозначные результаты, которые позволяют

исполнителю обнаружить ошибки в данных и таким образом быстрее выполнить уравнивание.

Алгоритм уравнивания высотных сетей значительно проще, так как высоты точек связаны с превышениями линейной зависимостью. Превышения между пунктами могут измеряться как геометрическим, так и тригонометрическим нивелированием. При геометрическом нивелировании измеренной величиной следует считать превышение по секции, проложенной между двумя закрепленными пунктами, а при тригонометрическом – превышение между конечными точками направления на пункте. Поэтому в первом случае уравниваются превышения по секциям, вычисленные в журнале геометрического нивелирования, а во втором превышения измерены по направлениям на станциях. Алгоритм программы допускает ввод превышений каждой станции геометрического нивелирования, но это вряд ли рационально, так как точки установки реек не маркируются и их высоты не используются.

Параметрическое уравнение поправок для превышения j -й секции в общем случае имеет вид

$$v_j = H_k - H_i - h_j, \quad \text{вес } p_j \quad (12)$$

$$(j=1, 2, \dots, q)$$

в матричной форме

$$V = CX + L, \quad (13)$$

где C – матрица коэффициентов перед параметрами.

Как и в случае уравнивания плановой сети система уравнений (13) решается методом сопряженных градиентов при условии метода наименьших квадратов: $V^T P V = \min$.

Вес превышения в j -й секции

$$p_j = \mu^2 / m_j^2, \quad (14)$$

где μ – ошибка единицы веса, которая выбирается произвольно и записывается в параметрах точности измерений проекта;

m_j – средняя квадратическая ошибка измеренного превышения, которая для геометрического нивелирования определяется Инструкцией [1], а для тригонометрического вычисляется программно.

Пользовательский интерфейс программного комплекса «МГСети» подробно описан в документации, которую можно найти по адресу (<http://gis.dgtu.donetsk.ua/newsiteversion/ru/mgseti.html>). Рассмотрим основные возможности этого комплекса.

Главное окно программы «МГСети» состоит из двух основных областей: исходных данных (рис. 2, слева) и графического отображения сети (рис. 2, справа). В первой имеются закладки: «Измерения», «Опора», «Проект», которые обеспечивают удобное управление данными.

Управление данными измерений. Измеренные данные представлены в соответствии с описанной

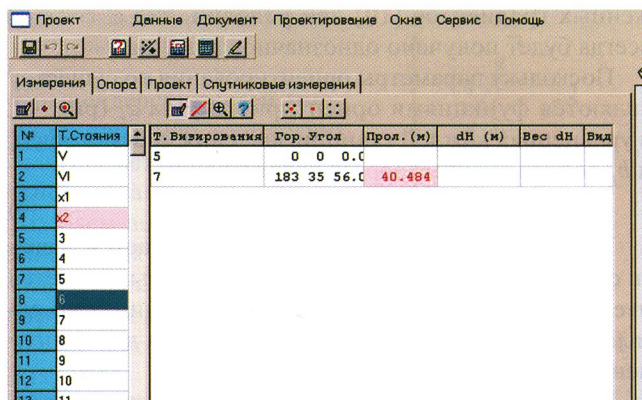


Рис. 2. Закладка с данными измерений.

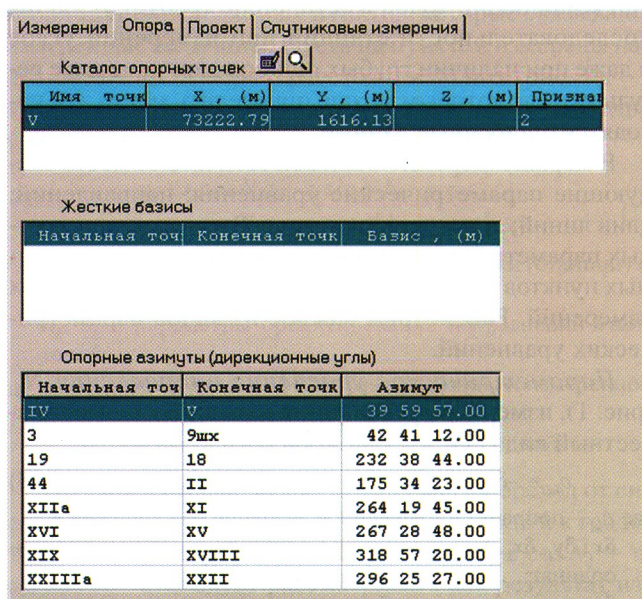


Рис. 3. Закладка с координатами исходных пунктов и дирекционными углами гиросторон.

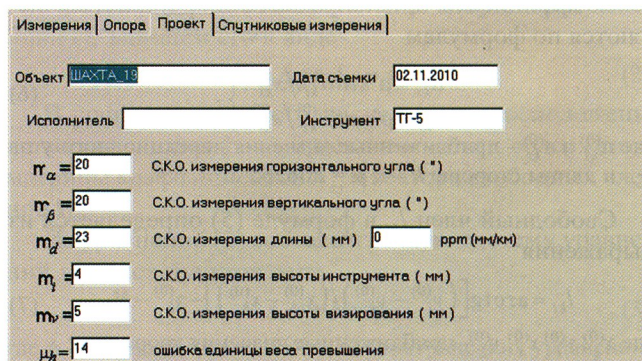


Рис. 4. Содержание закладки «Проект». С.К.О. – среднеквадратическая ошибка.

выше грамматикой. Поскольку станции могут располагаться в любом порядке, алгоритм не накладывает ограничений на количество пунктов в сети и позволя-

ет уравнивать как одну, так и несколько сетей в одном проекте, то данную закладку можно использовать в качестве базы измерений ходов шахты, пополняя ее измерениями новых ходов. Если на одном пункте выполнено несколько серий измерений, то можно вносить их независимо, программа учтет все измерения в соответствии с требованиями строгого уравнивания. Плановую сеть в одном проекте можно совмещать с высотной.

Измерения допустимо корректировать, удалять, «замораживать» и «размораживать». Для замораживания надо выполнить двойной клик мыши на нужной станции или на измеренной величине. Выбранное поле окрасится розовым фоном, а отмеченная величина или станция будет исключена из уравнивания. Измерения одного проекта можно объединять полностью или частично с измерениями другого проекта.

Указанные возможности позволяют легко управлять данными о сети шахты и без дополнительных затрат в любой момент выполнять строгий контроль качества измерений и точности координат любого пункта.

В закладке «Опора» помещаются опорные координаты исходных пунктов и дирекционные углы гиросторон (рис. 3). Эти данные имеют те же возможности управления, что и результаты измерений.

В закладке «Проект» (рис. 4) располагаются значения основных параметров точности для строгого уравнивания и главные сведения о проекте.

Оценка качества измерений и поиск грубых ошибок. Задача решается несколькими средствами. После уравнивания сети составляются все условные уравнения, вычисляются их фактические и допустимые невязки.

Уравнения (11) представим следующим образом

$$\begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \end{vmatrix} \Delta + \begin{vmatrix} L_1 \\ L_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix}, \quad (15)$$

т. е. разделив матрицы на субматрицы. Уравнения в системе можно так отсортировать, чтобы существовала матрица B_1^{-1} . Решая первое матричное уравнение в системе (15) относительно вектора Δ и подставляя его во второе, получим

$$B_2 B_1^{-1} V_1 - V_2 + (L_2 - B_2 B_1^{-1} L_1) = 0. \quad (16)$$

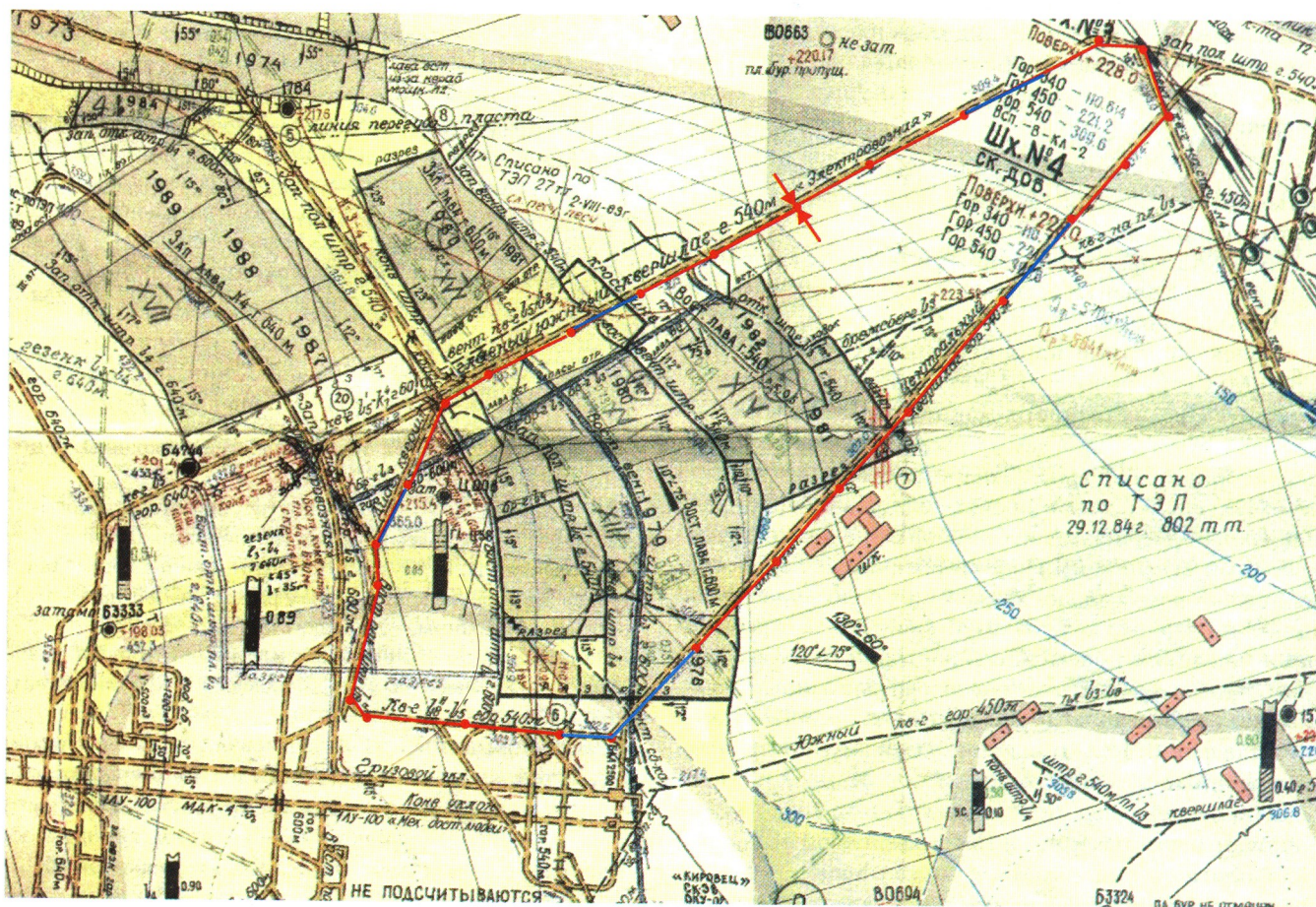


Рис. 5. Проектирование маркшейдерских сетей.

Уравнения (16) являются условными уравнениями поправок в измерения, вектор в скобках есть вектор невязок. На плане сети можно увидеть расположение измерений, входящих в каждое условное уравнение, и локализовать положение возможных грубых ошибок. Кроме того, на схеме сети столбцовыми диаграммами изображаются поправки в углы и длины, что тоже дает представление о распределении ошибок измерений.

Традиционно в используемых на практике программах уравнивания геодезических сетей вычисляются невязки отдельных ходов между узловыми пунктами и гиросторонами, и по невязкам оценивается качество измерений. Данный метод не строгий – координаты узловых пунктов зависимы, поскольку вычислены с использованием измерений оцениваемого хода. В комплексе «МГСети» такой анализ выполняется и определяется наиболее вероятное измерение, содержащее грубую ошибку.

При уравнивании методом наименьших квадратов грубые ошибки часто не выявляются в поправках, так как распределяются или «размазываются» по сети, поэтому «МГСети» имеют функцию уравнивания для поиска грубых ошибок. Для этого сеть может быть уравнена методом наименьших модулей, т. е. система уравнений (11) решается при условии

$$[pv] = \min. \quad (17)$$

Такой метод уравнивания локализует влияние грубой ошибки, а по диаграммам поправок на плане сети четко видно измерение, в котором наиболее вероятна грубая ошибка.

Простота управления данными позволяет опробовать разные варианты сети, легко и уверенно выявить грубые ошибки.

Проектирование маркшейдерских сетей. Комплекс «МГСети» позволяет выполнять проектирование сетей и оценку их точности. Для этого имеется возможность загрузить в программу растровое изображение плана горных работ (рис. 5) и построить на нем проект сети. На рис. 5 показан проект хода для осуществления сбойки квершлага (место сбойки показано двумя красными стрелками). Проектирование выполняется манипулятором-мышью. Указывается положение пунктов сети (красные кружочки), стороны хода (красные линии), а также положение гиросторон (голубые линии). Программа считывает необходимые данные и выполняет предрасчет сети. Для предрасчета сбойки можно выделить отдельно влияние угловых и линейных измерений.

Выводы. Предлагаемый программный комплекс «МГСети» удовлетворяет требованиям строгости и оперативности уравнивания подземных маркшейдерских сетей и может быть рекомендован для внедрения на горных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маркшейдерські роботи на вугільних шахтах та розрізах: Інструкція / Редкоміс.: М. Є. Капланець та ін. – Офіц. вид. – Донецьк: АЛАН, 2001. – 264 с. – (на рос. та укр. мовах).*
2. *Рыхлюк Е. И. Метод оценки точности уравновешенных величин при приближенных способах уравнивания и применение его к полигонометрии / Е. И. Рыхлюк // Труды ВНИМИ. – 1960. – Вып. 39. – С. 94 – 123.*
3. *Рыхлюк Е. И. Строгое уравнивание систем полигонометрических ходов и контроль их линейных невязок / Е. И. Рыхлюк // Методика и техника маркшейдерских работ. – 1973. – С. 49 – 55.*
4. *Рыхлюк Е. И. Предвычисление точности полигонометрических сетей, уравниваемых приближенными способами / Е. И. Рыхлюк // Методика и техника маркшейдерских работ. – 1973. – С. 43 – 48.*
5. *Хлебников А. В. Уравнивание опорных маркшейдерских сетей на ЭВМ способом замыкающих / А. В. Хлебников // Труды ВНИМИ. – 1973. – № 90. – С. 37 – 43.*
6. *Хлебников А. В. Универсальная программа обработки маркшейдерских плановых сетей / А. В. Хлебников // Маркшейдерское дело и геодезия. – 1979. – Вып. 6. – С. 18 – 24.*
7. *Музыкантов В. К. Программа формирования подземной маркшейдерской опорной сети с предварительным контролем качества измерений / В. К. Музыкантов, А. Н. Грищенко // Маркшейдерское обеспечение горных работ: тр. 5-й науч.-техн. конф. вузов Украины. – Донецк, 1997. – С. 54 – 56.*
8. *Музыкантов В. К. Строгая оценка качества измерений в подземных полигонометрических ходах / В. К. Музыкантов, А. Н. Грищенко // Маркшейдерское обеспечение горных работ: тр. 5-й науч.-техн. конф. вузов Украины. – Донецк, 1997. – С. 56 – 57.*
9. *Музыкантов В. К. Возможности снижения трудоемкости и повышения надежности подземного маркшейдерского обоснования / В. К. Музыкантов, А. Н. Грищенко // Маркшейдерское обеспечение горных работ: тр. 5-й науч.-техн. конф. вузов Украины. – Донецк, 1997. – С. 15 – 16.*
10. *Фаддеев Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фаддеев, В. Н. Фаддеева. – М.: Физматгиз, 1963. – 734 с.*
11. *Высшая геодезия / В. Г. Зданович, А. Н. Белоликов, Н. А. Гусев, К. А. Звонарев. – М.: Недра, 1970. – 512 с.*