Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им.Г.В.Плеханова, т.ХУШ, вып. 1, 1975 г.

ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Э.А.Бухман

Решение задач оперативного контроля параметров горного давления связано с необходимостью получать большой объем данных о напряженно-деформированном состоянии горного массива и креши выработок. Эти данные могут быть получены оперативно лишь при использовании специальной измерительной аппаратуры, например, разработанной в ИГИ [1]. Она позволяет воспринимать информацию от большого количества разного рода датчиков, расположенных в пределах всего шахтного поля на значительных расстояниях друг от друга. Как показали опытно-промышленные испытания на рудниках "Маяк" и "Каула-Котсельваара", эффективность подобной аппаратуры во многом зависит от метрологических параметров.

Важной метрологической характеристикой измерительных устройств, которая в совокупности учитывает погрешность и ширину диапазона прибора, является разрешающая способность. Как известно [2], разрешающая способность представляет собой число квантов измеряемой величины, вписывающихся в полосу погрешности измерительного устройства в пределах всего диапазона измерения, и вычисляется по формуле

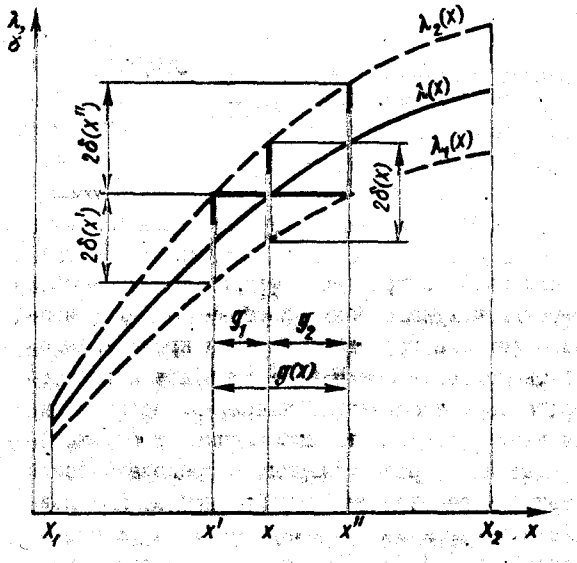
$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{dx}{g(x)}, \qquad (1)$$

где X_1, X_2 – соответственно нижний и верхний пределы диапазона измерения прибора; $g(x)$ – текущий интервал неопределенности измеряемой величины.

Вычисления по формуле (1) сопряжены со значительными трудностями, связанными с нахождением текущего интервала неопределенности и измеряемой величины по известным значениям ширины полосы погреш-

ностей прибора. Поэтому для упрощения расчетов полагают [2], что функция преобразования линейна, а текущий интервал неопределенности равен текущей полосе погрешностей прибора. Однако такие допущения в ряде случаев приводят к значительным ошибкам, в частности, при оценке метрологических возможностей индуктивных и струнных датчиков, широко используемых для измерения параметров горного давления и имеющих нелинейную функцию преобразования.

Рассмотрим общий случай (см.рисунок), когда функции преобразования и погрешности нелинейны, а текущий интервал неопределенности не равен текущему значению полосы погрешностей. Пусть измеряемая величина X имеет текущее значение x, при этом полоса погрешностей равна $2\delta(x)$. Тогда интервал неопределенности $q(x) = q_1 + q_2$ ограничен значениями измеряемой величины x' и x'', причем на границах интервала полоса погрешностей соответственно равна $2\delta(x')$ и $2\delta(x'')$. Обозначив через $\lambda = \lambda(x)$ и $\delta = \delta(x)$ функции преобразования и погрешности, запишем очевидное равенство



Пояснение к определению разрешающей способности

$$\lambda(x'') = \lambda(x) + \delta(x'') . \qquad (2)$$

Воспользовавшись разложением в ряд Тейлора, равенство (2) можно представить в виде

$$\lambda(x) + q_2\lambda'(x) + \varepsilon_1(q_2) = \lambda(x) + \delta(x) + q_2\delta'(x) + \varepsilon_2(q_2), \qquad (3)$$

где $\varepsilon_1(q_2)$ и $\varepsilon_2(q_2)$ – составляющие разложения в ряд Тейлора второго порядка и выше.

Учитывая, что в практике измерений обычно $|\varepsilon_1(q_2)| \ll \lambda(x) + q_2\lambda'(x)$ и $|\varepsilon_2(q_2)| \ll \delta(x) + q_2\delta'(x)$, выражение (3) можно представить в виде

$$q_2 = \frac{\delta(x)}{\lambda'(x) - \delta'(x)} .$$

Аналогичное соотношение получается и для величины q_1. Тогда

$$q(x) = \frac{2\delta(x)}{\lambda'(x) - \delta'(x)}$$

и разрешающая способность

$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{\lambda'(x) - \delta'(x)}{2\delta(x)}\, dx . \qquad (4)$$

Анализ уравнения (4) показывает, в отличие от формулы (1), что разрешающая способность зависит от чувствительности прибора, крутизны функции погрешности и нелинейности функций преобразования и погрешности. Последнее учитывается изменением $\lambda'(x)$ и $\delta'(x)$ по длине диапазона.

Определим разрешающую способность для наиболее часто встречающихся на практике случаев.

1. Для прибора с линейной функцией преобразования $\lambda = ax$ и чисто аддитивной погрешностью $\delta = \delta_0 = \text{const}$

$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{a}{2\delta_0}\, dx = \frac{a}{2\delta_0}(X_2 - X_1) . \qquad (5)$$

В этом случае при одинаковой величине погрешности и диапазоне измерения разрешающая способность тем выше, чем больше чувствительность прибора.

2. Для прибора с линейной функцией преобразования $\lambda = ax$ и чисто мультипликативной погрешностью $\delta = \gamma_s x$

$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{a - \gamma_s}{2\gamma_s x}\, dx = \frac{a - \gamma_s}{2\gamma_s} \ln \frac{X_2}{X_1} = \frac{1}{2}(k-1) \ln \frac{X_2}{X_1} , \qquad (6)$$

где $k = a/\gamma_s$ – относительная чувствительность прибора.

Из формулы (6) видно, что разрешающая способность прибора с одинаковой крутизной функций преобразования и погрешности (т.е. при $k = 1$) равна нулю.

3. Для прибора с линейной функцией преобразования $\lambda = ax$ и аддитивной и мультипликативной составляющими погрешностями $\delta = \delta_0 + \gamma_s x$

$$R = \int_{X_1}^{X_2} \frac{a - \gamma_s}{2(\delta_0 + \gamma_s x)}\, dx = \frac{a - \gamma_s}{2\gamma_s} \ln \frac{\delta_0 + \gamma_s X_2}{\delta_0 + \gamma_s X_1} = \frac{1}{2}(k-1) \ln \frac{\delta_0 + \gamma_s X_2}{\delta_0 + \gamma_s X_1} . \qquad (7)$$

Анализ формулы (7) показывает, что при фиксированной чувствительности прибора его разрешающую способность в основном можно увеличить только за счет уменьшения погрешности чувствительности γ_s.

Как правило, аппроксимирующие формулы функций преобразования и погрешности измерительных устройств определяются на основе экспериментальных данных, полученных при исследовании прибора. Поэтому

представляет интерес метод вычисления разрешающей способности непосредственно по экспериментальным данным без нахождения аппроксимирующей формулы функции преобразования. Решение задачи в этом случае сводится к следующему.

Пусть на основе экспериментальных данных известна полоса погрешностей устройства, которая в диапазоне $X_2 - X_1$ ограничена кривыми – сверху $\lambda_2(x)$, а снизу $\lambda_1(x)$ (см.рисунок). Воспользовавшись обратными функциями от $\lambda_2(x)$ и $\lambda_1(x)$, а также учитывая, что $\lambda_2(x_i) = \lambda_1(x_{i+1})$ определим $x_{i+1} = \lambda_1^{-1}(\lambda_2(x_i))$, где $i = 1,2,\ldots,R$, причем $x_1 = X_1$, а R таково,что $x_R < X_2$; $x_{R+1} \geqslant X_2$. В этом случае разрешающую способность можно считать равной R. Отсюда видно,что рассмотренный метод реализует,по существу, непосредственный счет интервалов неопределенности $q(x)$, укладывающихся в пределах диапазона измерения $X_2 - X_1$ в полосе погрешностей прибора, т.е. позволяет определить разрешающую способность в полном соответствии с ее определением.

Для сравнения результатов вычисления разрешающей способности тремя приведенными методами были проведены исследования модернизированного динамометра конструкции ЛГИ [4]. Модернизация заключалась в изменении конструкции преобразователя деформаций в частоту переменного тока, причем для увеличения чувствительности динамометра были использованы ферритовые сердечники типа СБ-30. Погрешности такого преобразователя в основном вызваны нестабильностью генерируемой частоты. Величина погрешности оценивалась энтропийным значением по формулам, приведенным в работе [3]. В результате получены следующие значения разрешающей способности преобразователя: а) по формуле (1) с указанными выше допущениями 898,6; б) по формуле (4) 1027; в) методом непосредственного счета 1030.

Большое различие в величине разрешающей способности, вычисленной по формулам (1) и (4), как раз и объясняется тем, что при вычислениях по формуле (1) не учитывалось изменение чувствительности преобразователя, которая колеблется в пределах диапазона измерения от 2806 до 443 Гц/мм.Наоборот, близкие значения разрешающей способности, полученные методом непосредственного счета по формуле (4), показывают, что она хорошо отражает физическую сущность процесса.

Учитывая, что разрешающая способность измерительного устройства связана с его точностью, определяем величину средней градации деформаций динамометра. Она составляет $1{,}96 \cdot 10^{-3}$ мм, что соответствует среднему приращению нагрузки 3,92 кгс. Значения же среднего приращения нагрузки, меньшие этой величины, не могут быть достоверно различимы и лежат в пределах погрешности измерений.

Из этого примера видно, что разрешающая способность измерительных устройств является достаточно полной метрологической характеристикой, которая в совокупности учитывает чувствительность прибора, изменение величины погрешности в пределах диапазона, его величину, а также нелинейность функций преобразования и погрешности. Она хорошо отражает физическую сущность измерительного процесса и может

использоваться в качестве основной метрологической характеристики устройств для измерения параметров горного давления.

Литература

1. Бухман Э.А. Автоматизированная система телеизмерения параметров проявлений горного давления. – В сб.: Новые исслед. в горн. деле, вып. 2, Изд. ЛГИ, 1970.

2. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., "Энергия", 1968.

3. Новицкий П.В., Иванова В.Я., Кондрашкова Г.А. Об использовании энтропийного значения погрешности в качестве критерия точности приборов и измерений. – "Измерительная техника", 1966, № 11.

4. Упрощенный метод замера нагрузок на крепь вертикального ствола и смещений окружающего породного массива. Зап. ЛГИ, т.57, вып. 1, 1969. Авт.: Г.Г.Мирзаев, В.Д.Ягодкин, Н.В.Семевская, Ю.С.Обручев, В.Л.Федулин.