

2. СОУ 10.1.05411357.010:2008. Система обеспечения надежного и безопасного функционирования горных выработок с анкерным креплением. Общие технические требования. – 89 с.

3. Черев Д.А. Выбор параметров рамно-анкерной крепи на основе исследования закономерностей изменения внутренних усилий.: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 225.0022 – Геотехнология (открытая, подземная и строительная), Екатеринбург, 2004.- 18с.

4. Методика определения параметров анкерных породо-армирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок : СТП (02070826) (26319481) / Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.О. Новиков и др. – Донецк–Доброполье, 2010. – 27 с.

УДК 622.281.74

Канд. техн. наук Ю.Н. Пилипенко
(ИГТМ НАН Украины)

ЭКСПРЕСС-ВИБРОКОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АНКЕРНОГО КРЕПЛЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Наведено теоретичні передумови та методичні основи діагностики стану анкерного кріплення гірничих виробок при виведенні зі стану рівноваги системи «кріплення-вуглепородний масив». Розроблено апаратуру віброконтролю для застосування в широкому діапазоні гірничо-геологічних умов.

EXPRESS-VIBROMONITORING OF ANCHOR SUPPORT QUALITY OF MINE WORKINGS OF COAL MINES

The theoretical premises and methodical basis of state diagnosis of anchor support of mine working at extraction from the state of equilibrium of the system “support – coal-rock massif” is indicated. The instrumentation of vibromonitoring in order to use it in the wide range of mine-geological conditions is developed.

подавляющее число аварий (около 65 %) происходит в очистных забоях. Это связано с обрушением непосредственной кровли с коэффициентом крепости пород 1,5-4,0. С момента введения анкерного крепления угольная отрасль многих стран значительно улучшила показатели по технике безопасности и статистике несчастных случаев. Их количество в категории «обрушение породы во время проходки выработок» уменьшилось на 73 % - с 3,4 до 0,9 на 100 000 человеко-смен. Перечисленные улучшения отражают влияние нового технического решения и связанный с ним регулярный контроль качества анкерного крепления на создание более безопасных условий труда. Среди известных методов диагностики наиболее широкое распространение получили геофизические, основанные на измерении динамических характеристик, как функции технического состояния объектов [1,2].

На современном этапе развития горной геофизики создание таких средств наиболее перспективно на базе виброакустического метода, что требует решения ряда задач аналитического, аппаратурного и методологического характера.

Для практической реализации необходимо применение микропроцессорных технологий с заранее установленными зависимостями, закономерностями и практическими решениями, которые должны выдаваться немедленно по критериальным значениям показателя, установленным экспериментально при оценке состояния кровли различной степени нарушенности в широком диапазоне горно-геологических условий [3]. На основании вышеизложенного цель настоя-

шей работы – разработать метод и средства эффективного контроля качества крепления выработок анкерной крепью.

Пусть имеем стержень постоянного сечения из вязко-упругого материала, закрепленного в слоистом массиве горных пород с отличными прочностными и упругими свойствами. Модель анкерной крепи и кровли горной выработки представлена на рис.1.

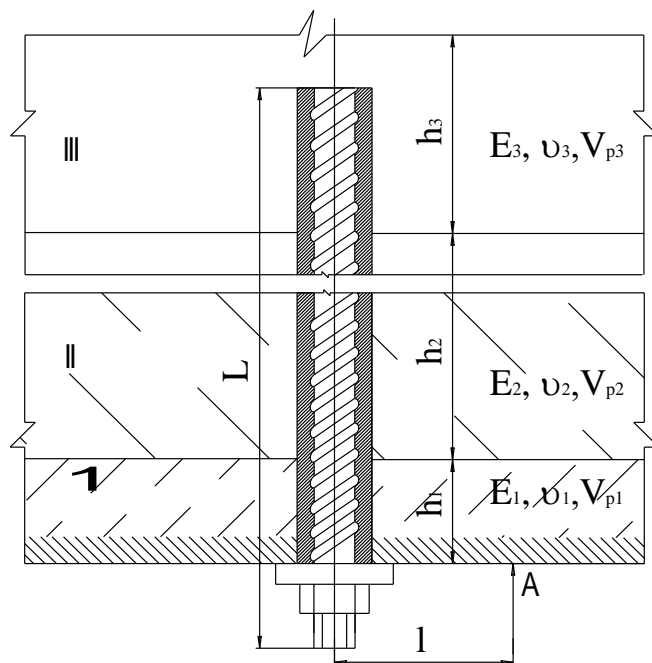


Рис. 1 – Модель взаимодействия анкерной системы и массива горных пород

В сечении $x = N$ к стержню приложена продольная сила единичной амплитуды, изменяющейся по гармоническому закону $p = \exp(i\omega t)$. Уравнение продольных колебаний стержня имеет вид [4]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left(1 + \beta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

где u - продольное перемещение сечения стержня, $a = \sqrt{E/\rho}$ - скорость распространения продольных волн по стержню, E - модуль Юнга материала стержня, ρ - плотность материала, β - коэффициент вязкого трения. Согласно [5] условия при $x = 0$ записываются следующим образом:

$$u|_{0-\varepsilon} = u|_{0+\varepsilon}, \quad N|_{0+\varepsilon} + \exp(i\omega t) = N|_{0-\varepsilon} \quad (2)$$

где $N = EF \left(1 + \beta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial u}{\partial x}$ – продольная сила, F – площадь поперечного сечения стержня.

Стационарное решение уравнения (1) при условиях (2) и дополнительном требовании убывания вибраций при $x \rightarrow \pm\infty$ имеет вид:

$$u(x, t) = u_-(\omega, x) \exp(i\omega t), \quad (3)$$

где $u_-(\omega, x)$ – амплитуда колебаний стержня, определяется из выражения:

$$u_-(\omega, x) = [2i\lambda EF(1 + i\beta\omega)]^{-1} \exp(-i\omega|x|) \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\omega}{a} (\gamma - i\eta), \quad \eta > 0 \quad (5)$$

причем γ и η определяются из уравнений:

$$(\gamma - i\eta)^2 = (1 + i\beta\omega)^{-1} \\ u = \left[2i \frac{\omega}{a} (\gamma - i\eta) EF (1 + i\beta\omega)^{-1} \exp\left(-\frac{\omega\eta|x|}{a}\right) \exp\left(i\omega\left(t - \frac{\partial|x|}{a}\right)\right) \right] \quad (6)$$

Виброколебания анкера представляют собой затухающую бегущую волну.

Пусть теперь в сечении $x = x_1 > 0$ к стержню упруго присоединена масса m_1 : диссипация энергии в упругом элементе учитывается введением комплексной жесткости:

$$\bar{c}_1 = c_1 \left(1 + i \frac{\psi_1}{2\pi} \right),$$

где ψ_1 – коэффициент поглощения энергии. Упруго присоединенная масса играет роль демпфера.

Перемещение стержня под действием сил $\exp(i\omega t)$ и $p_1 \exp(i\omega t)$, приложенных в сечениях $x = 0$ и $x = x_1$, в соответствии с (3), (4) определяется формулой:

$$u(x, t) = [2i\lambda EF(1 + i\beta\omega)]^{-1} \left[\exp(-i\lambda|x|) + p_1 \exp(-i\lambda|x - x_1|) \right] \exp(i\omega t) \quad (7)$$

Условия в точке присоединения демпфера имеют вид:

$$p_1 \exp(i\omega t) = \bar{c}_1 (u_1 - u(x_1, t)), \quad (8)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \bar{c}_1 (u_1 - u(x_1, t))$$

где u_1 – перемещение массы m_1 .

Определив u_1 в виде $u_1 = u'_1(\omega) \exp(i\omega t)$, получим с учетом (7) вместо (8) систему линейных алгебраических уравнений для определения p_1 и u_1 . Решив ее, найдем:

$$p_1 = - \frac{\omega^2 m_1 \tilde{c}_1 \exp(-i\lambda|x_1|)}{(\omega^2 m_1 - \tilde{c}_1) 2i\lambda EF(1 + i\beta\omega) + \omega^2 m_1 \tilde{c}_1} \quad (9)$$

$$u_1 = \frac{p_1}{\omega^2 m_1}$$

Подставляя (9) в (7) найдем перемещение стержня с присоединенным динамическим гашением колебаний:

$$u(x, t) = u_+(\omega, x) \exp(i\omega t) \quad (10)$$

$$u_+(\omega, x) = [2i\lambda EF(1 + i\beta\omega)]^{-1} \left[\exp(-i\lambda|x|) - \frac{\omega^2 m_1 \tilde{c}_1 \exp(-i\lambda|x_1|) \exp(-i\lambda|x - x_1|)}{(\omega^2 m_1 - \tilde{c}_1) 2i\lambda EF(1 + i\beta\omega) + \omega^2 m_1 \tilde{c}_1} \right] \quad (11)$$

где $u_+(\omega, x)$ – амплитуда колебаний стержня с демпфером.

В случае, когда к стержню в сечении $x = 0$, приложена продольная нагрузка $P(t)$ спектральное представление нагрузки имеет вид:

$$P(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(i\omega t) V(\omega) d\omega,$$

где $V(\omega)$ - случайная функция интенсивностью $S(\omega)$.

Неслучайная функция $S(\omega)$ является спектральной плотностью нагрузки $P(t)$. В дальнейшем рассматривается воздействие с узкополосным спектром:

$$S(\omega) = \begin{cases} S_0, & \text{при } \nu_1 \left(1 - \frac{\Delta}{2}\right) \leq |\omega| \leq \nu_1 \left(1 + \frac{\Delta}{2}\right), \\ 0, & \text{вне указанного диапазона} \end{cases},$$

где относительная ширина полосы $\Delta \ll 1$.

Дисперсия перемещений $u(x,t)$ в точке с координатой x определяется формулой:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} |u(\omega, x)|^2 S(\omega) d\omega, \quad (12)$$

где $u(\omega, x)$ - амплитуда колебаний стержня под действием гармонической силы частоты ω и единичной амплитуды, приложенной в сечении $x=0$; для стержня:

$$D_-(x) \approx 2v_1 \Delta S_0 \left(2 \frac{v_1}{a} EF \right)^{-2} \exp\left(-\frac{\beta v^2 |x|}{a} \right), \quad (13)$$

а для стержня с демпфированием: $D_+(x) \approx k(x)D_-(x)$,

где k - коэффициент передачи вибраций, характеризующий эффективность динамического гашения колебаний, определяется формулой:

$$k = 1 - \tilde{\mu} \left[2 \exp\left(-\frac{\beta v_1 y}{2} \right) \cos y - \tilde{\mu}(\tilde{\mu} + \tilde{\psi})^{-1} \exp(-\beta v_1 y) \right] \operatorname{arctg}(\tilde{\mu} + \tilde{\psi}),$$

где $y(x) = \frac{v_1}{a} (|x_1| + |x_1 - x| - |x|)$, $\tilde{\mu} = \pi \mu / \Delta$ - безразмерный инерционный параметр, равный отношению массы участка кровли массива горных пород, вовлеченных в процесс гашения колебаний к массе части стержня, длина которого равна длине бегущей волны с частотой v_1 ; $\tilde{\psi} = \psi_1 / 2\pi\Delta$ - безразмерный параметр.

В табл. 1 представлены параметры коэффициентов передачи вибрации для двух шахтопластов, отличающихся по строению, составу и физико-механическим свойствам пород.

Для реализации теоретических предпосылок разработан прибор, функциональная схема и внешний вид которого представлены на рис. 2.

Прибор состоит из следующих блоков: системы усиления 1, блока запуска 2 и управления 3, 4, измерительных устройств 5, 6, 7, 17, 18, 19, блока пиковых индикаторов 11 и фильтров 12, 13, 14, блока индикации, контроля и фильтров 10, блока индикации нормированного уровня сигнала 10, отсека питания.

Колебания анкера, воспринимающего колебания кровли после нанесения удара, генерируют в датчике сигнал, который поступает на предварительный усилитель и измерительный блок, где усиливается усилителем-интегратором и поступает на аналоговый ключ, который открыт в течение фазы t_1 . По окончании фазы t_1 ключ закрывается, и сигнал поступает на вход интегратора и блок запуска и управления. В фазе t_2 схема управления пропускает стабилизированные импульсы от генератора тактовых импульсов на вход счетчика дешифратора, выходы, которых связаны с цифровым индикатором.

Таблица 1 – Параметры коэффициента передачи вибрации для пород кровли

№ слоя	Мощность слоя, м	Характеристика пород кровли	Физико-механические свойства			Коэффициент передачи вибрации, k
			Категория устойчивости	Прочность на сжатие, МПа	Плотность, t/m^3	
Основная кровля пласта C_5 шахты «Павлоградская»						
6	2,3-4,7	Алевролит слоистый, средней крепости, легкообрушаемый.	A1	18-20	2,7	2,18-6,51
7	0,0-0,4	Угольный пропласток – трещиноватый.		30-35	1,3	
8	0,0-1,8	Песчаник, кварцевый, мелкозернистый, на глинистом цементе, легкообрушаемый	A1	30-40	2,7	
Непосредственная кровля пласта C_5 шахты «Павлоградская»						
9	7,4-10,5	Аргиллит горизонтально слоистый, средней крепости, неустойчивый – «ложная» кровля.	B1-B2	12-18	2,6	
Основная кровля пласта d_4 шахты «Красноармейская-Западная № 1»						
1	3,8-9,5	Песчаник полевошпатово-кварцевый, на глинистом цементе, мелкозернистый, водонасыщенный крепкий.	A2	45,2-127,3	2,65-2,77	6,11-14,60
2	0,4-4,2	Алевролит. Трещиноватый, средней крепости.	A1	45,1-50,2	2,75	

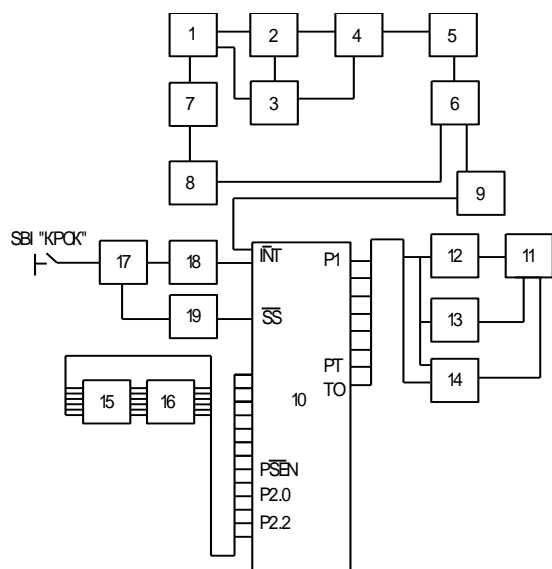


Рис. 2 – Функциональная схема и внешний вид прибора виброконтроля качества закрепления анкерной крепи.

После измерительного устройства сигнал поступает на пиковые индикаторы нормированного сигнала и фильтры. Если сигнал меньше установленного порога срабатывания или намного больше, то индикация цифрового отсчета не происходит, поэтому удар по кровле повторяют с большей или меньшей скоростью. В случае поступления нормированного импульса открываются ключи, и сигнал поступает через блок фильтров на индикаторы частоты, которые вместе с показателями цифровой индикации с помощью таймера сохраняются, в течение 5 сек. Питание прибора осуществляется от преобразователя напряжений через гасящие резисторы.

Прибор выполнен на микросхемах и предназначен для исследования возможности экспресс-виброконтроля состояния анкерной крепи и получения основных зависимостей и закономерностей при контроле качества установки анкерной крепи и оперативного контроля нагружения анкеров. Для проведения измерений на анкер навинчивают датчик и фиксируют его стопорным винтом. Ударником наносят удар по кровле на расстоянии 0,4 – 0,6 м от подхвата в заранее выбранную точку кровли со сравнительно ровной поверхностью. Во время удара происходит индикация амплитуды импульса, если параметры импульса соответствуют нормированному сигналу, то зажигается зеленый светодиод, а на индикаторе появляются цифровые показания, соответствующие величине вибросмещения и параметрам спада вибросигнала. Показания прибора не должны отличаться более чем на 10 %. Для первичного анализа результатов аппаратного контроля строят графики изменений вибросмещений, затухания виброколебаний и определяют экстремальные значения. Дальнейшая обработка результатов проводится в два этапа. Первый – определение коэффициентов вязкого трения, поглощения энергии, коэффициентов передачи вибрации, нагрузки на анкерную крепь $P_{дин}$. Второе – установление корреляционных зависимостей $P_{нагр.стат.} = f(P_{дин})$ и $I_{выдер} = f(k)$.

Таким образом, для оценки технического состояния анкерной крепи, необходимо знать амплитудно-частотную характеристику пиковых значений гармоник вынужденных колебаний анкера и коэффициент передачи вибрации k , характеризующий переходную функцию демпфирования колебаний анкерного стержня (определяемого качеством химического закрепления анкера в шпуре).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виттенберг, Д. Применение ультразвуковой измерительной техники на установленных породных анкерах / Д. Виттенберг // Глюкауф. – 2001. – № 2(4). – С.23-27.
2. Вознесенский, В.А. Компьютерное моделирование диагностики анкерной крепи / В.А. Вознесенский // ГИАБ. – № 11.- С. 99-105.
3. Методические рекомендации по геофизическому контролю и диагностике геомеханического состояния подземных геотехнических систем угольных шахт / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, С.И. Скипочка и [др] – Днепропетровск-Донецк: ВИК, 2009. – 80 с.
4. Бабницкий, В.И. Теория виброударных систем / В.И. Бабницкий – М.: Наука, 1970. - 341 с.
5. Волков, В.В. Диагностика дефектных состояний сложных механических конструкций при виброиспытаниях / В.В. Волков, А.Л. Клумбис // Вибротехника. – 1981. – № 1. – С. 43-49.