

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МОБИЛЬНЫХ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Розглянуто питання аналізу динамічних погрешностей мобільних інформаційно-вимірювальних систем шахтних підймальних комплексів.

**THE ANALYSIS OF DYNAMIC ERRORS OF MOBILE INFORMATION-  
MEASURING SYSTEMS  
FOR MINE ELEVATING COMPLEXES**

The questions of the analysis dynamic errors of mobile information-measuring systems for mine elevating complexes are considered.

Известно, что в Украине, как и во всем мире, значительно возросла, а в будущем еще больше увеличится, глубина шахт. Необходимость перехода на более глубокие горизонты и увеличение объемов добычи полезных ископаемых требуют более интенсивной эксплуатации и, следовательно, повышенной надежности армировки ствола. Ствол – это единственное звено, которое связывает выработки с поверхностью. От четкой его работы зависит производительность всей шахты и ее рентабельность. Одним из общепризнанным направлением повышения безопасности подъема является оценка эксплуатационных качеств крепи и армировки с помощью мобильных информационно измерительных системных комплексов (МИИСК), обеспечивающих измерения нагрузок и линейных ускорений на рабочих скоростях и режимах шахтного подъемного комплекса (ШПК).

Начиная с 1993 года в ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова разработаны и используются ряд МИИСК, а в рамках действующей в Кривбассе системы контроля безопасной эксплуатации глубоких стволов с 1998 года производится плановая проверка и динамический контроль армировки этими МИИСК [1,2]. К настоящему времени такой контроль осуществлен на 18 шахтах Кривого Рога, Желтых Вод, Смолино, Днепрорудного и Кировограда.

Однако до настоящего времени отсутствуют методы анализа динамических погрешностей МИИСК, что не позволяет правильно оценить их работу, выбрать рациональные режимы и методику измерения нагрузок и линейных ускорений.

Общей проблемой МИИСК является работа в режиме реального времени, т.е. измерение проходит в рабочем режиме работы ШПК. Реальные МИИСК обладают динамическими (инерционными) свойствами. Инерционность проявляется в том, что регистрируемые показания МИИСК недостаточно быстро следуют за действительным изменением линейных ускорений или нагрузок при натуральных шахтных измерениях.

Исходным в описании МИИСК является дифференциальное уравнение, связывающее выходную величину  $y(t)$  с входной  $x(t)$ . Это уравнение отличается от обычного уравнения измерительного преобразования наличием членов, содер-

жащих производные от выходного сигнала  $y(t)$ , которые и определяют динамические свойства МИИСК. Оно вырождается в обычное уравнение преобразования при равенстве нулю членов, содержащих производные. Таким образом, в динамическом режиме работы погрешность МИИСК представляет собой сумму динамической и статической погрешностей. Однако представление МИИСК, например с датчиком МП-95 [3,4], дифференциальным уравнением второго порядка, не является однозначным, а зависит от скорости изменения входного воздействия, точности анализа, а также входных и выходных величин. У измерительного резистора датчика типа МП-95 при быстрых изменениях силы тока начинает проявляться влияние собственной емкости и индуктивности, и тогда вынужденно придется учитывать это волнообразное возмущение, т.е. переходить к уравнениям в частных производных. Известная из теории автоматического управления передаточная функция  $S(p)$  – подробная, но малонаглядная характеристика динамических свойств МИИСК, к тому же ее трудно определить экспериментально. Определение динамической погрешности по классическим выражениям и формулам приведенным, например, в работе [5], хотя принципиально и возможно, однако на практике встречает существенные трудности, поскольку точное аналитическое выражение для  $y(t)$ , как правило неизвестно, а определение производных от  $x(t)$  по зарегистрированному МИИСК выходному сигналу не может быть проведено с необходимой точностью. Поэтому удобнее оценивать динамические погрешности отдельно для переходного режима работы МИИСК и для установившегося режима. По этому в своей двенадцатилетней практике нами используются характеристики, которые можно рассматривать как решение дифференциальных уравнений при типовых воздействиях  $x(t)$  и начальных условиях  $y(0)$ : реакцию МИИСК на воздействие в виде единичного скачка  $h(t)$  и реакцию на синусоидальное воздействие - амплитудо-частотную и фазо-частотную характеристики.

Известно, что в измерительной технике переходной режим принято оценивать временем установления значения – определяемым временем затухания свободных колебаний до некоторой малой величины, при которой практически можно считать, что наступает установившийся режим аппаратуры. В теории автоматического управления принято, что, как правило, переходная функция хорошо аппроксимируется экспонентой, поэтому МИИСК можно представить апериодическим звеном. Тем более, что аналого-цифровой преобразователь типа ДАС рад-71-А/В МИИСК «МАК-1» характеризуется по паспорту постоянной времени (время преобразования  $T = 25$  мкс), это само по себе указывает на то, что МИИСК можно рассматривать как апериодическое звено. Вышесказанное позволяет определить время, необходимое для приближения переходного процесса в МИИСК к установившемуся режиму с заданной точностью (см. табл. 1)

Из-за наличия аналого-цифрового преобразователя в МИИСК возникают погрешности двух видов: квантования и восстановления. Погрешность квантования является чисто статистической, так как она не зависит от скорости изменения усилия или возмущения. Отнесение погрешности квантования к динамическим погрешностям является ошибочным. Погрешность восстановления, на-

оборот, является динамической, так как зависит от частоты изменения измеряемой величины. Основной особенностью погрешности восстановления МИИСК является ее существенная зависимость от выбранного способа восстановления. Поэтому, указывая численное значение погрешности восстановления МИИСК, необходимо обязательно учитывать конкретный способ восстановления. Многолетний опыт показал, что результирующая погрешность МИИСК есть результат погрешностей квантования и восстановления, принимаемых независимыми. Поэтому их удобно рассматривать отдельно, полагая, что при анализе погрешности квантования отсутствует погрешность восстановления и, что в последствии они могут быть просуммированы.

Таблица 1 –Точность МИИСК «МАК-1» при переходном режиме.

Погрешность приближения переходного процесса в МИИСК к измеряемому мгновенному значению в %	Требуемое время измерения в мкс
10	57,5
5	75
1	115
0,1	175

Практически в МИИСК используются три метода восстановления: экстраполяция, интерполяция и приближение. В режиме реального времени для первичной обработки используется только экстраполяция. Для вторичной обработки применяется интерполяция и приближение. Предпочтение отдается линейной интерполяции, реже используем полиномы второго порядка. Полиномы более высоких порядков в практике не используются, так как это требует больших аппаратных затрат и даёт незначительные уменьшения погрешности восстановления по сравнению с погрешностью, получаемой при линейной интерполяции.

Специфической погрешностью МИИСК является динамическая погрешность, вызванная инерционностью МИИСК, так как измеренный результат пропорционален не мгновенному, а среднему значению усилия или нагрузки за измерительный интервал. Поскольку операция усреднения линейна, ее можно условно представить линейным динамическим звеном. С помощью преобразования Фурье можно получить частотную характеристику операции усреднения  $\varphi(\omega) = -\omega T_{изм}/2$ . Это выражение соответствует постоянной задержке измеренного результата на  $T_{изм}/2$ . Следовательно, для коррекции этой задержки результаты измерения МИИСК необходимо относить к середине измерительного интервала (хотя они всегда получаются в конце интервала). Свойство усредняющего звена, что в измерительный интервал укладывается целое число периодов сигнала, а чувствительность равна нулю, используется для подавления основного шахтного помехового сигнала с частотой 50 Гц электрической сети 220/380 Вольт.

При выборе  $T_{изм}=20$ мс на результат измерения практически полностью устраняется влияние помехи 50 Гц и всех ее гармоник. В ограниченной области частот полезного сигнала (10 Гц) при  $\omega T_{изм}/2 \leq \pi/2$  можно, воспользовавшись разложением  $\sin x = x - x^3/3! + x^5/5! - \dots$ , представить амплитудно-частотную

характеристику усредняющего звена, по которой найти динамическую погрешность усреднения. Как известно, при натуральных шахтных измерениях решается задача нахождения измеряемой величины  $x(t)$  (линейных ускорений или нагрузок) по реакции МИИСК. Если рассматривать МИИСК как динамическое звено первого порядка, то его уравнение будет:

$$T_1 y'(t) + y(t) = k_1 x(t), \quad (1)$$

где  $k_1$  - номинальный коэффициент преобразования МИИСК,  $T_1$  - постоянная времени звена первого порядка,  $y(t)$  - значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $y'(t)$  - первая производная значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $x(t)$  - измеряемая величина (линейное ускорение или нагрузка).

В нашей практической задаче интерес представляет оценка максимальной динамической погрешности при следующих ограничениях: диапазон изменения входного сигнала  $\pm x_m$  (линейные ускорения  $\pm g$ , а для нагрузок  $\pm 50$  кН), спектр сигнала ограничен частотой  $\omega_m = 10$  Гц [6]. В этом случае, на основании уравнения (1) динамическая погрешность МИИСК по входу определится выражением:

$$\Delta x(t) = -T_1 y'(t) k^{-1}$$

а максимальное значение модуля этой погрешности:

$$\max |\Delta x(t)| = -T_1 \max |y'(t)| k^{-1}$$

Для оценки  $\max |y'(t)|$  воспользуемся неравенством С.Н. Бернштейна [7]:

$$\max |y'(t)| \leq \omega_m |y_m| \leq \omega_m k x_m$$

где  $|y_m|$  - модуль максимально возможного значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $k$  - максимально возможный коэффициент передачи для звена первого порядка,  $\omega_m$  - граничная частота входного сигнала,  $x_m$  - максимально возможное значение сигнала на входе звена (МИИСК).

Понятно, что  $k$  равно коэффициенту передачи МИИСК, следовательно:

$$\max |\Delta x(t)| \leq T_1 \omega_m x_m$$

Исходя из этого выражения, максимальная погрешность полезного сигнала (приведенная к диапазону изменения  $\pm x_m$ ) будет:

$$\max \gamma = \max |\Delta x(t)| (2x_m)^{-1} \leq T_1 \omega_m \cdot 2^{-1} = \omega_m \cdot (2 \cdot \omega_0)^{-1},$$

где  $\omega_0 = 1/T_1$

Если же представить МИИСК как динамическое звено второго порядка, то его уравнение будет:

$$y''(t)(\omega_0^2)^{-1} + 2\beta y'(t)(\omega_0)^{-1} + y(t) = kx(t),$$

где  $\omega_0$  - частота колебательного звена,  $\beta$  - степень (коэффициент) успокоения звена,  $y''(t)$  - вторая производная значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $y'(t)$  - первая производная значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $y(t)$  - значения сигнала на выходе звена (МИИСК),  $x(t)$  - измеряемая величина (линейное ускорение или нагрузка),  $k$  - номинальный коэффициент передачи для звена второго порядка.

Тогда, аналогично используя вышеприведенные ограничения и неравенство Бернштейна, выведем погрешность полезного сигнала:

$$\Delta x(t) = -y''(t)(\omega_0^2 k)^{-1} - 2\beta y'(t)(\omega_0^2 k)^{-1},$$

а ее максимальная погрешность для вышеперечисленных идентичных ограничений и условий:

$$\max |\Delta x(t)| = \max |y''(t)(\omega_0^2 k)^{-1} + 2\beta y'(t)(\omega_0 k)^{-1}| \leq \omega_m^2 k_m x_m (\omega_0^2 k)^{-1} + 2\beta \omega_m k_m x_m (\omega_0 k)^{-1}, \quad (2)$$

где  $k_m$  - коэффициент передачи для звена второго порядка соответствующий максимальному отклонению измеряемой величины.

Однако, значение коэффициента  $k_m$ , соответствующего максимальному отклонению, неизвестно. Более того, для звена второго порядка, как это известно из теории автоматического управления, в общем случае  $k_m$  может быть как меньше, так и больше  $k$ . Это обусловлено тем, что для звена второго порядка вид амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики существенно зависит от степени успокоения  $\beta$ . Известно, что для звена второго порядка различают три режима работы: колебательный, критический и апериодический, причем каждый из них имеет свои особенности и ограничения, а параметром различия режимов является величина  $\beta$ . Для принятого ограничения на максимальную частоту спектра полезного сигнала (до 10 Гц) по экспериментальным амплитудно-частотным характеристикам можно определить максимальное значение  $k_m$  в рабочем диапазоне частот и подставить его в выражение (2) для оценки динамической погрешности. Например полагая, что МИИСК имеет  $\beta \geq 0,7$  т.е.  $k_m \leq k$ . Считаем  $k_m = k$ , тогда максимальная погрешность полезного сигнала (приведенная к диапазону изменения  $\pm x_m$ ) будет:

$$\max \gamma = \max |\Delta x(t)| \cdot (2 \cdot x_m)^{-1} \leq \omega_m^2 (2 \omega_0^2)^{-1} + \beta \omega_m (\omega_0)^{-1}.$$

Выводы:

1. Выражения (1) и (2) дают завышенную оценку (оценку сверху) максимальной динамической погрешности МИИСК.
2. Полученные оценки можно использовать для установившегося режима только при ограниченном спектре входного сигнала.
3. Наиболее объективно и точно динамическую погрешность МИИСК можно оценить, используя одновременно пробные воздействия: в виде единичного

скачка и синусоидальное (во всем рабочем диапазоне частот). Ясная физическая интерпретация и относительная простота экспериментального определения частотных характеристик МИИСК предпочтительнее для практического применения при натурных работах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин С.Р., Лопатин В.В., Послед Б.С.. Компьютерная система диагностики подземного оборудования подъемных установок // Тез. докл. конф. "Механика и новые технологии". – Севастополь. – 1995. – С. 63-66.
2. Ильин С.Р., Гавруцкий А.Е. Повышение безопасности работы шахтных подъемов путем применения компьютерных технологий и средств электронного контроля за состоянием оборудования стволов в Приднепровском регионе // Геотехническая механика: Сб. науч. трудов / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск. – 1998. – Вып.6. – С. 169-173.
3. Лопатин В.В. Динамика измерительного устройства МП-95 при контроле плавности движения подъемных сосудов шахтных подъемных установок // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – №3(7). – С.84-85
4. Лопатин В.В. Структурно-функциональная схема экспресс-диагностирования динамического состояния системы «подъемный сосуд – жесткая армировка» // Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб. – 2001., – Вып. 29. – С. 187-189
5. Kuo.B. Analysis and Synthesis of Sampled-Data Control Systems. Prentice-Hall, 1996. – 404 p.
6. Лопатин В.В. Методы и технические устройства экспресс-диагностики динамического состояния системы «подъемный сосуд – жесткая армировка»: Дис... канд. техн. наук 05.05.06. Дн-ск 2001. – 248 с.
7. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 116 с.

**УДК 624.647.2**

Асп. С.В. Монастырский,  
канд. техн. наук Р.В. Кирия  
(ИГТМ НАН Украины)

#### **КРИТЕРИИ ВОЗМОЖНЫХ ОТКАЗОВ И ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

Розглянуто питання наукового обґрунтування критеріїв, які необхідні для моделювання можливих відмов завантажувальних пристроїв стрічкових конвеєрів на стадії проектування. Обґрунтовані критерії міцності, працездатності, надійності і втрати функцій призначення деталей завантажувального пристрою.

#### **CRITERIA OF POSSIBLE REFUSALS AND PERMISSIBLE VALUES OUT-COMING PARAMETERS OF LOADING DEVICES**

The questions of scientific grounds of criteria of possible refusals of loading devices of belt conveyers necessary for the modeling of their reliability on the stage of planning are considered. The criteria of durability, capacity, reliability and loss of functions of setting loading device are grounded.

Для расчета надежности загрузочных устройств ленточных конвейеров на стадии проектирования, которые будут эксплуатироваться в различных горно-технических условиях, необходимы модели потоков их отказов для формирования выборок наработки на отказ. Согласно [1-3] возможные отказы элементов загрузочных устройств при моделировании надежности по их выходным параметрам могут возникать при следующих условиях: