

## УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ШПУ ОТ ЗАВИСАНИЯ СОСУДА В СТВОЛЕ

*Н.А. Чехлатый, К.Ю. Баранов, ПАО «НИИГМ им. М.М. Федорова», Украина*

Проведен анализ существующих устройств защиты шахтных подъемных установок от аварийных ситуаций, описаны методы и средства контроля зависания сосуда в стволе. Предложен комплекс технических средств, предназначенный для контроля и защиты шахтных подъемных установок, а также повышения эффективности и безопасности их эксплуатации.

От надежности работы шахтных подъемных установок зависит не только объем добычи полезного ископаемого, но и нормальное функционирование, бесперебойность работы всего горнодобывающего предприятия. Любая аварийная ситуация на подъеме ведет к остановке предприятия, поэтому вопросам обеспечения надежности и безопасности эксплуатации шахтных подъемных установок всегда уделяли особое внимание.

Обеспечение эффективности и безопасности эксплуатации подъемных установок, своевременное обнаружение нарушений в режимах их работы и принятие необходимых мер по предупреждению аварий напрямую связаны с применяемыми устройствами защиты и блокировки. Так, в соответствии с требованиями правил безопасности в угольных шахтах, подъемная установка должна быть оборудована устройствами для защиты от провисания струны каната и напуска каната в ствол (ПБ п. 7. 7. 5 г), а также средствами контроля выдергивания тормозных канатов в месте их крепления в зумпфе или продергивания их в амортизаторах (ПБ п.7. 7. 5 ж).

Таким образом, актуальность работы определена требованиями обеспечения безопасности и надежности эксплуатации шахтных подъемных установок, особенно в условиях нестандартных ситуаций при движении сосудов в стволе.

В процессе работы подъемной установки в элементах подвесных устройств помимо статических усилий, обусловленных весом приложенного груза, возникают дополнительные динамические усилия.

Значительных величин динамические усилия могут достичь в экстремальных случаях. Одним из случаев возникновения экстремальной нагрузки на подвесное устройство является включение ловителя парашюта.

Торможение клетки при включении ловителя парашюта в общем случае может осуществляться за счет упругого удлинения тормозных канатов и перемещения клетки вместе с тормозными канатами относительно амортизаторов.

Перемещение сечения тормозного каната, расположенного на произвольном расстоянии  $X$  от места его закрепления в амортизаторе при действии на канат статической нагрузки определяется по формуле:

$$U_x = \frac{x}{EF} (Q + ql \frac{qx}{2}), \quad (1)$$

где  $Q$  – вес падающей клетки;  $E$  – модуль упругости тормозного каната;  $q$  – вес одного погонного метра каната (эквивалентного весу двух тормозных).

Выражение для определения напряжения в любом сечении тормозного каната представлено в виде:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_{cm}}{l(2 + \alpha)} [l(1 + \alpha) - \alpha x] \left( 1 + \frac{\varepsilon}{2} + \sqrt{\gamma v} \right). \quad (2)$$

Замедление клетки при торможении ее амортизатором рассчитывается по формуле:

$$J = -\frac{d^2 S}{dt^2} = g \left( \frac{R}{Q_0} - 1 \right), \quad (3)$$

а сила сопротивления, на которую настроен амортизатор

$$R = Q_0 \left( \frac{J}{g} + 1 \right). \quad (4)$$

Согласно действующим нормам величина  $j \leq 50 \text{ м/с}^2$ .

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что экстренная нагрузка на тормозной канат и подвесное устройство шахтной клетки при включении ловителя парашюта минимум в 6 раз превышает статическую, слагающуюся из веса порожней клетки и веса тормозных канатов.

Общий недостаток всех видов защит, основанных на измерении прогиба струны каната, – ограниченность их действия по глубине ствола. С одной стороны, это связано с тем, что при застревании опускающегося сосуда на определенной глубине ствола вес вертикальной части каната будет поддерживать струну каната в натянутом состоянии и ее прогиб может оказаться недостаточным для воздействия на подканатную конструкцию. При этом возникает задача определения зоны действия подканатной защиты и средств контроля напуска каната.

Натяжение вертикальных отвесов  $P_1$  и  $P_2$  в точках схода канатов с копровых шкивов при подъеме левого сосуда определяется из выражения:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= [m_1 + q(H + h_r - z) + p(h_y + z)](g + a_y), \\ P_2 &= [m_2 + q(h_0 + h_r + z) + p(H + h_y - z)](g - a_y). \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

При подъеме правого сосуда копровые усилия определяются при подстановке в (5) вместо координаты  $z$  разности  $H - z$ .

В любом из этих вариантов  $z$  – перемещение поднимающегося сосуда по вертикали вверх, отсчитываемое от нижней приемной площадки. Кроме того, в соотношениях (5) обозначено:  $H$  – высота подъема;  $h_r$  и  $h_y$  – минимальные длины головного и уравнивающего канатов;  $h_0$  – координата взаимного расположения по вертикали копровых шкивов,  $q$  и  $p$  – погонные массы головного и уравнивающего канатов (масса каната единичной длины);  $g$  – ускорение свободного падения;  $a_y = a_y(z)$  – алгебраическая величина текущего ускорения подъемной машины при выполнении заданного режима движения в соответствии с проектной рабочей тахограммой.

В аварийных ситуациях, при застревании опускающегося сосуда при конкретном значении координаты  $z = z_{ав}$ , отсчитываемой от начального положения поднимающейся клетки в стволе, усилие в опускающейся ветви в течение довольно короткого времени уменьшаются до величины

$$\left. \begin{aligned} P_1^{\min} &= q(H + h_r - z_{ав})(g + a_y) \\ P_2^{\min} &= q(h_0 + h_r - z_{ав})(g - a_y). \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Для *неуравновешенной* подъемной установки (уравнивающий канат отсутствует) в соотношениях (5) необходимо принять  $p = 0$ :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= [m_1 + q(H + h_r - z)](g + a_y), \\ P_2 &= [m_2 + q(h_0 + h_r + z)](g - a_y). \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В случае *полной уравновешенности* в (5) следует принять  $q = p$ :

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= [m_1 + q(H + h_r + h_y)](g + a_y), \\ P_2 &= [m_2 + q(H + h_0 + h_r + h_y)](g - a_y), \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

На рис. 1 показано, как изменяются углы наклона струны  $\bar{\psi}_i$  в зависимости от дирекционного угла  $\beta$  при постоянном значении  $\lambda = 0,1$ .

Из рис.1 видно, что как сами углы  $\bar{\psi}_i^0$ , так и интервалы их изменения невелики. Так, если создаваемое защитное аппаратное средство для обнаружения аварийного события зависания клетки в стволе основано на измерении углов отклонений струны в окрестности точек набега каната на барабан машины, то измерительное устройство принципиально не должно реа-

гировать на изменение углов в интервале  $[0, \bar{\psi}_i]$ , иначе может произойти ложное срабатывание защиты при обычном режиме спуска или подъема порожней клетки.

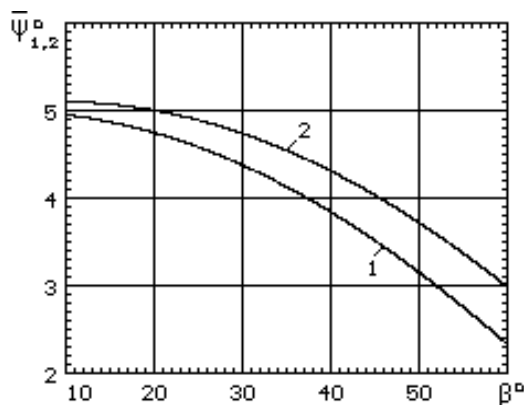


Рис. 1. Зависимости максимальных углов отклонений струн от дирекционного угла

Следовательно, нижней границей диапазона измеряемых углов  $\Delta\psi^{ann}$  является число

$$\bar{\psi} = \max(\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2),$$

определяемое для конкретно известного дирекционного угла  $\beta$ .

Как следует из рис. 1 максимальным углом из  $\bar{\psi}_1, \bar{\psi}_2$  является всегда угол  $\bar{\psi}_2$  (для верхней струны) во всём диапазоне изменения  $\beta$ , поэтому выражение для числа  $\bar{\psi}$  запишем как

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}_2. \quad (10)$$

На рис. 2 показаны зависимости величины  $\bar{\psi}$  от дирекционного угла  $\beta$  при различных значениях дирекционного параметра  $\lambda$ . Отсюда следует, что защитный угол  $\bar{\psi}$  монотонно уменьшается при увеличении  $\beta$  и увеличивается при уменьшении.

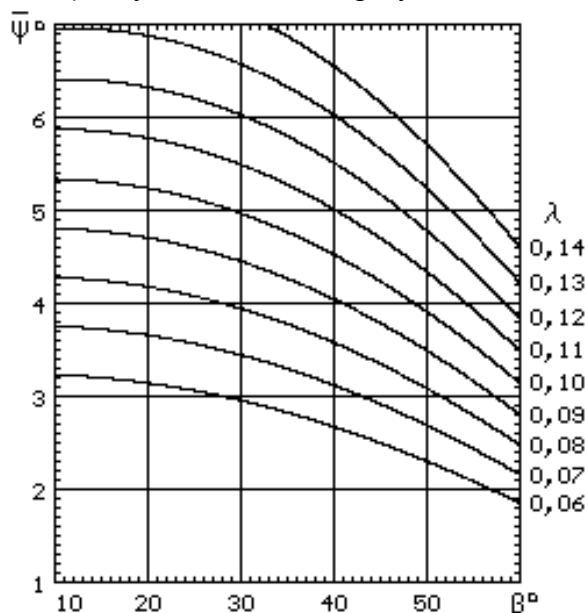


Рис. 2. Зависимость защитного угла от  $\beta$  и  $\lambda$

На рис. 3 показано, как изменяются безразмерные усилия  $\bar{P}_{ГР} = P_{ГР} / (qgl_1)$  и  $\bar{P}_{ГР} = P_{ГР} / (qgl_2)$  в зависимости от дирекционного угла  $\beta$  при постоянной величине дирекционного параметра  $\lambda = 0,1$ .

На рисунке выносные цифры 1 и 2 относятся соответственно к нижней и верхней струне. Изображенные графики свидетельствуют о том, что граничные усилия изменяются в сравнительно небольших пределах. Величина  $P_{гр}$  для нижней струны оказывается несколько большей, чем для верхней, значит нижняя струна более «склонна» к образованию петли при одном и том же значении дирекционного угла.

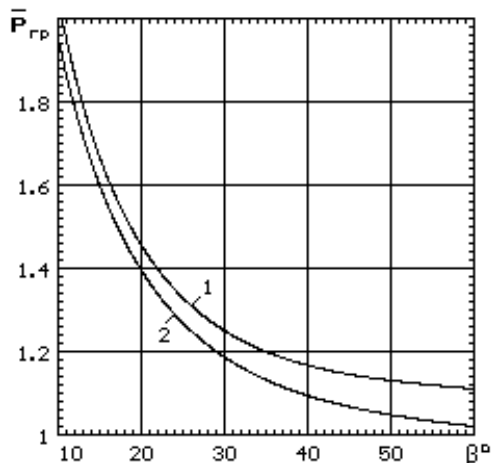


Рис. 3. Зависимости граничных усилий от дирекционного угла

В некоторых исследуемых аварийных вариантах подъемной установки возникает потребность в определении критического усилия  $P_{кр}$ , при застревании опускаемого сосуда (например, правая клеть) на верхней приемной площадке.

В начальный момент времени  $t_0$ , когда днище клетки только соприкоснулось с кулаками, копровое усилие определяется из выражения

$$P_2 = P_2^{\max} = [m_2 + q(h_0 + h_r)]g = 45000 \text{ Н} \quad (11)$$

Для случая не остановленной машине усилие  $P_2$  уменьшается, и при этом вращение шкива происходит по ходу часовой стрелки.

В некоторый момент времени  $t_1$ , когда клеть еще не целиком опустилась на кулаки, неизбежно наступает равенство  $P_2 = P_{гр} = 9440 \text{ Н}$  ( $\beta = 27^\circ$ ;  $\bar{P}_{гр} = 1,23$ , график 2 на рис. 3;  $l_2 = 65 \text{ м}$ ).

В интервале времени  $[t_0, t_1]$  верхняя струна опускается, и имеют место неравенства  $P_2^{\max} \geq P_2 \geq P_{гр}$ , то есть усилие  $P_2$  оказывается напускообразующим.

При  $t > t_1$  копровое усилие  $P_2$  продолжает уменьшаться, а струна — опускаться, шкив всё еще продолжает вращение по ходу часовой стрелки, и в некоторый момент времени  $t_2$ , когда наступает равенство  $P_2 = P_{кр}$ , движение шкива прекращается. Таким образом, в интервале времени  $[t_1, t_2]$  имеют место неравенства  $P_{гр} \geq P_2 \geq P_{кр}$ , то есть копровое усилие  $P_2$  в указанном интервале времени становится петлеобразующим.

При  $t > t_2$  усилие  $P_2$  начинает возрастать, а шкив начинает вращаться против хода часовой стрелки.

На рис. 4 изображены зависимости безразмерных усилий  $\bar{P}_{кр} = P_{кр} / (qgl_i)$  от дирекционных углов  $\beta$  при значениях  $\lambda = 0,06; 0,1; 0,14$ .

Для случая, когда  $\beta = 27^\circ$  по графику 2 при  $\lambda = 0,1$  находим  $\bar{P}_{кр} = 0,911$ , и при  $l_2 = 65 \text{ м}$  - вычислим значение  $P_{кр} = 6970 \text{ Н}$ . Минимально возможное копровое усилие в данном случае есть  $P_2 = P_2^{\min} = 2600 \text{ Н}$ .

Значит, при наступлении вырожденного состояния клеть не устанавливается на кулаки ( $P_{кр}$  почти в три раза превышает  $P_2^{\min}$ ).

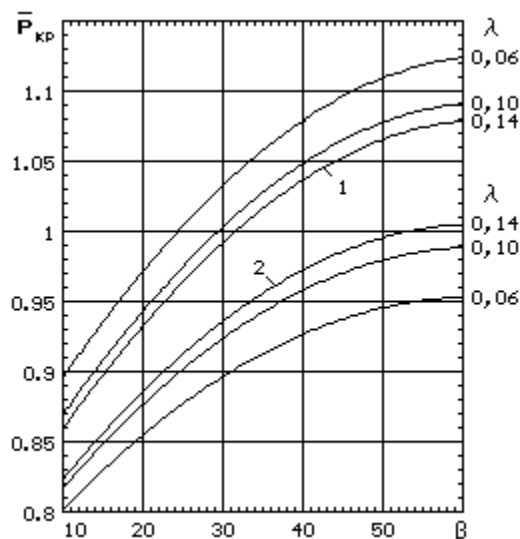


Рис. 4. Зависимости критических усилий от дирекционных углов

На рис. 5 показано, как изменяются углы  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  при изменении соответствующих копровых усилий  $P_1$  и  $P_2$  (направление изменения усилий символизируют стрелки). Вертикальные пунктирные линии 1–1 и 2–2 соответствуют уровням граничных и критических усилий. Начиная с точки «X», струна переходит в вырожденное состояние.

Из приведенных графиков видно, что по мере приближения усилий  $P_i$  к критическому увеличивается скорость изменения углов  $\psi_i$ . В точках «Z» (то есть в точках пересечения кривых с линиями 1–1 в нижней части) угол наклона струны  $\psi - \alpha = 0$ , что соответствует началу процесса петлеобразования.

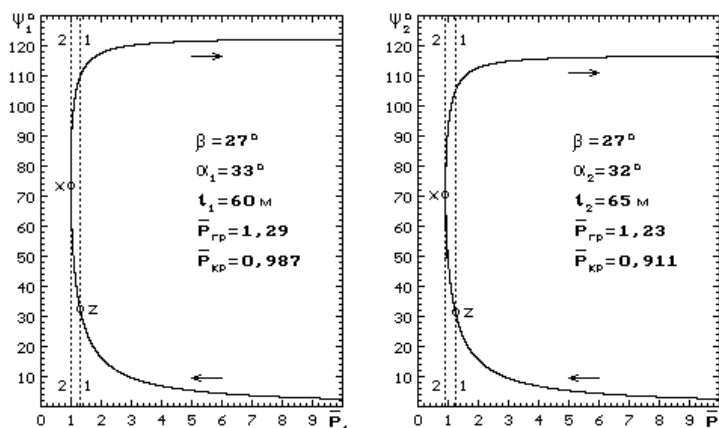


Рис. 5. Характер углов отклонений струны в точках набегания каната на барабан вдали и в окрестности критической точки перехода в вырожденное состояние

Из рис. 5 можно сделать следующий важный практический вывод, что при выполнении условия

$$P_{1,2}^{\min} \leq P_{ГР}, \quad (12)$$

диапазон измеряемого отклонения  $\psi_i$  от геометрически угла наклона  $\alpha_i$  определяется интервалом  $[\bar{\psi}_i, \alpha_i]$ , где  $\bar{\psi}_i$  – максимальный угол отклонения в обычном рабочем режиме.

Неравенству (12) соответствуют вполне определенные длины вертикальных отвесов канатов, при которых может возникнуть аварийная ситуация, приводящая к петлеобразованию. Полагая в выражениях (6)  $a_y = 0$  и обозначив длины вертикальных отвесов канатов как

$$L_1^{oms} = H + h_\Gamma - z_{ав}, \quad L_2^{oms} = h_0 + h_\Gamma + z_{ав}, \quad (13)$$

где  $z_{ав}$  – координата поднимающегося сосуда, при которой опускающийся сосуд предположительно зависает, получим

$$L_i^{oms} \leq \frac{P_{ГР}}{qg} = \bar{P}_{ГР} l_i. \quad (14)$$

Таким образом, предельные “аварийные” длины отвесов, разграничивающие области петлеобразования и напускообразования, можно определять, например, для верхней струны при дирекционном угле  $\beta = 27^\circ$  и  $l_2 = 65$  м находим по графику 2 на рис. 3 число  $\bar{P}_{ГР} = 1,23$ , значит, если застревание правой опускаемой клетки случится при длине отвеса  $L_2^{oms} \leq 80$  м =  $\bar{P}_{ГР} l_2$ , то происходит петлеобразование. При этом с помощью второй из формул (12) вычислим  $z_{ав} \leq 58$  м.

Для нижней струны при том же дирекционном угле имеем  $l_1 = 60$  м,  $\bar{P}_{ГР} = 1,29$  петлеобразование происходит при застревании левой опускающейся клетки, если длина отвеса  $L_1^{oms} \leq 77$  м =  $\bar{P}_{ГР} l_1$ , что соответствует координате  $z_{ав} \geq 538$  м.

Если же авария возникнет, в отличие от (14), при  $L_i^{oms} > \bar{P}_{ГР} l_i$ , то в этом случае петлеобразование струны не происходит, канат напускается на клеть при не остановленной машине, а струна приобретает форму, которая соответствует копровому напускообразующему усилию  $P_i = P_i^{\min}$ , и при этом угол  $\psi_i$  сохраняется неизменным в течение всего времени процесса напуска.

Рассмотрим динамическое состояние копрового шкива, начиная с некоторого момента времени  $t_0$ , когда опускающаяся клеть застопорилась, и, следовательно, нижний конец вертикального отвеса каната становится как бы «зашемленным» при постоянной длине отвеса  $L_0$ .

В [1] получено уравнение движения шкива в форме:

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + [V^2 + \mu^2(u)]u = \mu^2(u) \tilde{z}(\tau). \quad (15)$$

На рис. 6 графически изображено решение уравнения (15). Здесь необходимо иметь в виду то обстоятельство, что для безразмерной переменной  $u(\tau)$  разность  $l_{ГР} - l_{кр}$  отрицательна, поэтому вращение шкива по движению часовой стрелки соответствуют отрицательным значениям  $u(\tau)$ . Решение получено  $V = 0,1$  м/с при  $\tilde{z}(\tau) = 0,2\tau$ . В качестве начальных условий при  $\tau = 0$  принято:  $u(0) = 0$ ,  $\dot{u}(0) = 0,2$ .

Из рис. 6 видно, что в окрестности  $\tau \approx 2$  наблюдаются заметные нелинейные искажения функции  $u(\tau)$ . Именно в это время копровое усилие становится близким к критическому, и в дальнейшем, если представить, что канат отсоединен от клетки, происходит безудержное вращение шкива против движения часовой стрелки.

Для решения задачи повышение эффективности и безопасности эксплуатации ШПУ разработан комплекс технических средств КТС ШПУ, который предназначен для контроля и защиты шахтных подъемных установок от напуска каната в ствол, срабатывания парашютных устройств, выдергивания тормозных канатов в месте их крепления в зумпфе или продергивания их в амортизаторах, а также для контроля местоположения подъемного сосуда в стволе (рис.7).

Комплекс КТС ШПУ выполняет следующие функции:

- определение местоположения подъемного сосуда в стволе;

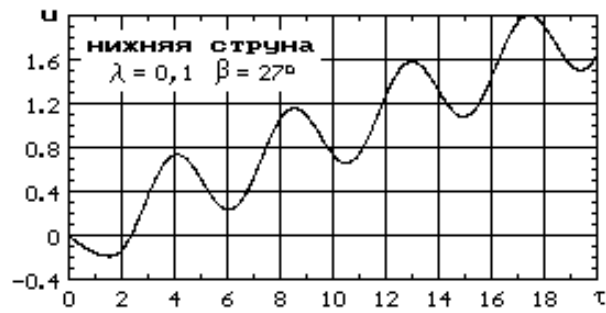


Рис. 6. Характер вращения шкива при достижении в отвесе критического усилия

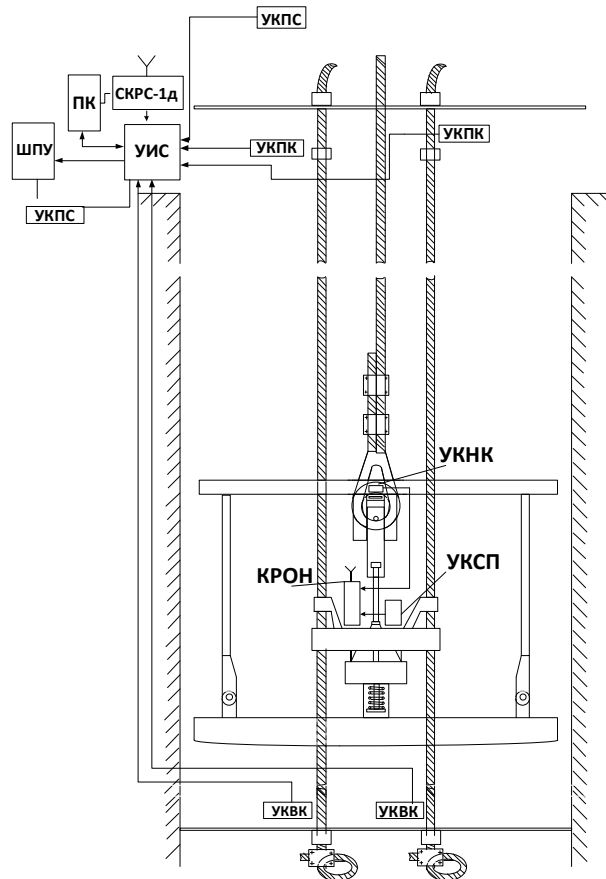


Рис. 7. Блок-схема и расположение блоков и устройств комплекса КТС ШПУ

- контроль срабатывания парашютных устройств;
- контроль выдергивания тормозных канатов в местах их крепления в зумпфе или продергивания их в амортизаторах;
- передачу на станцию машиниста сигналов от датчиков безопасности (например, напуска каната, закрытия решетки и прочее);
- передачу на станцию машиниста сигналов повреждения линии связи;
- контроль исправности канала радиосвязи;
- контроль заряда аккумулятора блока питания;
- отображение на станции машиниста принятых командных сигналов «Вверх», «Вниз» и «Стоп» в звуковой и световой формах;
- предоставление информации о контролируемых параметрах;
- выявление и индикацию недопустимых или опасных отклонений от установленных значений параметров;
- регистрацию и архивирование информации о контролируемых параметрах.

В состав КТС ШПУ входят: устройство контроля состояния парашюта УКСП; устройство контроля продергивания тормозных канатов УКПК; клетевая радиостанция КРОН; стационарная ра-

диостанция СКРС -1д; устройство контроля положения сосуда УКПС; устройство контроля выдергивания тормозных канатов УКВК; устройство индикации и сигнализации УИС; устройство контроля наклона каната УКНК; устройство контроля провисания струны каната УКПС.

Комплекс работает следующим образом. Информация от устройства контроля состояния парашюта УКСП и устройства контроля наклона каната УКНК поступает в клетевую радиостанцию КРОН, сигнал с которой передается по радиоканалу на стационарную радиостанцию СКРС -1д и далее – на устройство индикации и сигнализации УИС. Сигналы от устройств: контроля положения тормозных канатов УКПК, контроля выдергивания каната УКВК и контроля положения сосуда УКПС поступают к устройству индикации и сигнализации УИС. С выхода УИС информация передается по интерфейсу RS232/484 на персональный компьютер ПК.

При определении технических характеристик устройства УКНК установлена чувствительность по углу наклона, которая должна быть не более  $25^\circ$ , а расчеты проведенные для основных типов канатов с реальными концевыми нагрузками дали необходимую величину чувствительности 0,2-1,5 мм для регистрации нагрузки на канат.

Анализ колебательных процессов каната позволил установить, что частота колебаний усилия в канате лежит в пределах 0,3-2,4 Гц, при амплитуде 1,4-1,8 от номинального натяжения, частота поперечных колебаний 0,5-1,9 Гц. Для восстановления формы сигнала, в соответствии с теоремой Котельникова, необходимо обеспечить передачу данных с частотой большей  $2 \times F_{\max}$ .

Установлено, что контроль натяжения и наклона каната позволит зарегистрировать момент начала напуска каната, для принятия оперативных мер (например, включение аварийного тормоза).

После установки датчика на головной канат и подаче напряжения питания начинается выполнение управляющей программы микроконтроллера МК, который формирует тестовые сигналы для магниточувствительных микросхем ЧЭ1 и ЧЭ2, трёхосевого гироскопа Г и трёхосевого акселерометра А, а также сигналы управления источниками опорного напряжения ИОН1 и ИОН2. После этого происходит считывание информации с аналоговых входов МК с последующим анализом исправности.

Анализируя информацию с выходов трёхосевого гироскопа Г, трёхосевого акселерометра А и датчика температуры ДТ микроконтроллер МК выполняет измерение текущих показаний для данного режима. Одновременно происходит подстройка коэффициентов усиления усилителей У1 и У2 путём изменения коэффициентов усиления и величин сигналов управления на выходах источников опорного напряжения ИОН1 и ИОН2. После установки исходного состояния кнопочный выключатель КН отключается, в результате чего устройство подготовлено к работе.

После снятия сосуда с жёсткого основания датчиком натяжения каната, с помощью магнито-чувствительных микросхем ЧЭ1 и ЧЭ2 (например, датчики Холла с усилителями), измеряется натяжение каната по величине изменения магнитного поля, создаваемого магнитом М.

На рис. 8 показана структурная схема датчика наклона [4].

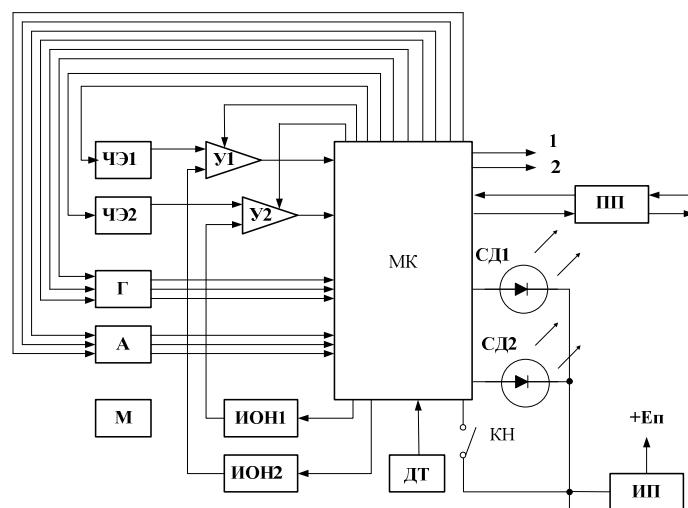


Рис. 8. Структурная схема датчика наклона



С помощью трёхосевого гироскопа Г и трёхосевого акселерометра А измеряется текущее положение каната относительно вертикали. Микроконтроллер МК сравнивает текущие показания с калибровочными, определяя угол наклона. При этом с помощью трёхосевого гироскопа Г и датчика температуры ДТ происходит корректировка показаний акселерометра А. В основе алгоритма определения угла наклона (АУН) лежит интегрирование ускорений и угловых скоростей. Акселерометр измеряет проекции кажущегося ускорения на свои оси чувствительности, гироскоп – абсолютную угловую скорость.

В институте разработано и утверждено в Минтопэнерго техническое задание на комплекс КТС ШПУ, а также изготовлены и испытаны в лабораторных условиях отдельные блоки комплекса.

#### Выводы

1. Теоретически обоснована область эффективного использования защиты от напуска каната, основанной на принципе измерения угла отклонения струны от её условного состояния непосредственно вблизи барабана машины. Так, в нормальных эксплуатационных режимах работы подъемной установки максимальные значения углов отклонения струны от его условного состояния находятся в интервале от 2-х до 7-и градусов дуги в зависимости от исходных параметров системы. Угол внутри указанного интервала, названный *приборным*, в каждом конкретном случае должен быть нижней границей измерительного устройства.

2. При некоторых значениях копрового усилия (*петлеобразующего*) в струне возникает петля, когда самая нижняя её точка оказывается ниже точки схода каната с барабана, и в этом случае не происходит напуск каната на подъемный сосуд. Усилие (*напускообразующее*), не приводящие к образованию петли, вызывает реальный напуск каната. Усилие, разграничивающее области петлеобразующих и напускообразующих усилий, является *граничным*.

3. Формообразование линии провисания струны характеризуется еще одним значением копрового усилия, названным *критическим*, при котором статическая форма струны оказывается неустойчивой. Критическое усилие представляет собой в то же время физический критерий, означающий переход струны в вырожденное состояние.

4. При «неблагоприятных» сочетаниях исходных параметров установки возможно существование так называемой *теневого зоны*, в пределах которой распознать событие напуска каната не представляется возможным. *Глубина* теневой зоны – это, как правило, сравнительно небольшой интервал положений сосуда в стволе, отсчитываемый от нижней приемной площадки. Глубина теневой зоны практически не зависит от параметров  $\beta$  и  $\lambda$ , но существенно уменьшается при увеличении массы порожней клетки и уменьшении погонной массы каната.

5. Внедрение КТС ШПУ позволит повысить эффективность эксплуатации подъемной установки за счет качественного контроля параметров безопасности: срабатывания парашютных устройств; прoderгивания тормозных канатов в амортизаторах и определения местонахождения подъемного сосуда.

#### Список литературы

1. Бежок В. Р., Дворников В. И., Манец И. Г., Пристром В. А. Шахтный подъем. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 624 с.

2. Латыпов И.Н. Обоснование и обеспечение безопасной эксплуатации шахтных барабанных подъемных установок: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Екатеринбург, 2008 г.

3. Корняков М.В. Защита шахтных подъемных установок от динамических нагрузок при движении сосуда в глубоком стволе: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Иркутск, 2008 г.

4. Пат. 97929 Україна, МПК В66С 13/04. Пристрій для виміру натягу та нахилу каната / М. О. Чехлатий, А. Ю. Грицаєнко, С. О. Євсюков та ін. – № а 2011 08953; заявл. 18.07.11; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3. – 6 с.