

Трибухин А.В., аспирант (НИИГМ им. М.М. Федорова)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ КАНАТАМИ МНОГОКАНАТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

У статті наведено ретроспективний огляд методів і засобів контролю параметрів розподілу навантаження між канатами багатоканатного підйому.

Запропоновані нові алгоритми визначення параметрів регулювання розподілу навантаження між головними канатами багатоканатної підіймальної установки за результатами вимірювань величин зусиль в канатах безпосередньо під час виконання робочого циклу підйому.

Алгоритми розроблені на основі аналізу закономірностей формування зусиль в канатах при жорсткій підвісі підйомних посудин.

В статье приведен ретроспективный обзор методов и средств контроля параметров распределения нагрузки между канатами многоканатного подъема.

Предложены новые алгоритмы определения параметров регулировки распределения нагрузки между головными канатами многоканатной подъемной установки по результатам измерения величин усилий в канатах непосредственно во время выполнения рабочего цикла подъема.

Алгоритмы разработаны на основе анализа закономерностей формирования усилий в канатах при жесткой подвеске подъемных сосудов.

In the article given the retrospective survey of the methods and means of the control of the distribution loading parameters among the ropes of the multi-rope hoist.

Suggested the new algorithms of the parameter definition of the regulation of the loading distribution among the head ropes of the multi-rope hoist unit according to the results of the effort values in the ropes directly during the fulfilling of the hoisting working cycle.

Algorithms are elaborated on the basis of the regulation analysis of the effort forming in the ropes in rough hoist of the hoisting vessels.

КС: *многоканатные подъемные установки, шахтные канаты, загрузка, контроль и регулировка распределения загрузки, усилия в канатах, определение параметров.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Характерной особенностью многоканатных подъемных установок является подвеска подъемных сосудов на нескольких головных канатах. Для нормальной работы многоканатной подъемной установки необходимо обеспечить равномерное распределение общей концевой нагрузки между головными канатами. Неравномерность распределения нагрузки может стать причиной перегрузки, преждевременного выхода из строя и даже обрыва отдельных головных канатов, интенсивного износа отдельных ручьев футеровки приводного шкива, нарушения центровки сосуда и т.п.

Неравномерность натяжения канатов ветви вызывается в основном различиями [1]:

- длин головных канатов;
- диаметров ручьев футеровки приводного шкива и диаметров самих канатов;
- жесткостей головных канатов.

При различии длин канатов более короткие канаты воспринимают большую нагрузку. Различия длин канатов обусловлены навеской канатов неодинаковой длины и неодинаковой их вытяжкой в процессе эксплуатации.

При различии жесткостей головных канатов менее жесткие канаты оказываются недогруженными. Причинами различия жесткостей являются отличия механических

характеристик отдельных канатов и неодинаковые изменения жесткостей при эксплуатации из-за различной степени вытяжки и износа канатов.

При различии диаметров ручьев футеровки приводного шкива и диаметров самих канатов последние перемещаются несинхронно. Даже небольшие отличия в диаметрах навивки канатов могут вызывать значительный перегруз.

Для нормальной работы многоканатного подъема необходимо периодически контролировать и регулировать распределение нагрузки между канатами.

Учитывая большую интенсивность работы подъемных установок, применяемые способы контроля и регулировки натяжений канатов должны быть простыми, надежными и нетрудоемкими.

Анализ исследований и публикаций. Исследованиями закономерностей распределения нагрузки между канатами многоканатных машин, влияния неравномерности распределения на работу машин и решением задач контроля и регулировки распределения нагрузки занимались многие ученые. Наибольший вклад в решение указанных задач в разные годы внесли чл.-корр. АН УССР, докт. техн. наук, проф. П.П.Нестеров, чл.-корр. АН УССР Ю.П.Шабанов-Кушнаренок, докт. техн. наук, проф. В.И.Дворников, докт. техн. наук, проф. Н.Г.Гаркуша, канд. техн. наук, А.А.Шматков, канд. техн. наук А.Ф.Новиков, М.Ю.Константинов, канд. техн. наук А.И.Соломенцев, С.А.Евсюков, Г.С. Лямин и другие исследователи.

Целью данной работы является разработка алгоритмов расчета параметров регулировки распределения нагрузки между головными канатами многоканатной подъемной установки на основе анализа закономерностей формирования усилий в канатах при жестком соединении их с сосудами.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **задачи исследования:**

- исследованы основные закономерности формирования усилий в канатах многоканатной подъемной установки при жестком присоединении канатов к сосудам;
- исследована зависимость распределения нагрузки между канатами от направления движения и местоположения сосудов в стволе;
- исследована зависимость распределения нагрузки между канатами от разницы радиусов навивки и длин головных канатов;
- на основании анализа закономерностей формирования усилий в канатах уточнены причины нарушения равномерности распределения нагрузки между канатами, разработаны алгоритмы определения параметров регулировки распределения нагрузок между канатами по результатам измерения усилий в головных канатах.

Изложение основного материала. Все подвесные устройства можно разделить на две группы:

- уравнивательные с автоматическим поддержанием равенства усилий в канатах;
- безуравнивательные с периодической регулировкой усилий путем изменения длин канатов.

Стремление равномерно распределить нагрузку между канатами многоканатной подъемной машины привело к тому, что в первые годы эксплуатации многоканатных подъемных установок появилось большое разнообразие конструкций уравнивательных подвесных устройств [2,3,4,5,6].

Из всего разнообразия подвесных устройств с автоматическим поддержанием равенства усилий в головных канатах на практике получили распространение балансирные подвесные устройства и гидравлические подвесные устройства.

Из группы подвесных устройств, позволяющих регулировать усилия в канатах путем изменения их длин, известны винтовые подвесные устройства. Получили распространение подвесные устройства со съемными звеньями для регулировки длин.

На многоканатных подъемных установках угольных шахт известно применение комбинации подвесных устройств, когда на одном из сосудов навешиваются балансирные подвесные устройства, а на другом – винтовые [2,4].

Подвесные устройства, которые применяются на шахтах, в том числе и уравнильные, фактически не обеспечивают автоматического выравнивания усилий в канатах по многим причинам.

Во-первых, комбинированная схема применения подвесных устройств (на одном сосуде навешивается уравнильное подвесное устройство, а на другом – безуровневое) только частично может решить вопрос выравнивания усилий в канатах. Со стороны безуровневого подвесного устройства усилия фактически не выравниваются.

Во-вторых, уравнильные балансирные подвесные устройства, претерпев ряд упрощений в процессе совершенствования конструкции, в результате которых из конструкции исключен третий балансирующий элемент, утратили способность выравнивать усилия между парами канатов, так что по отношению к этим парам балансирные подвесные устройства являются безуровневыми.

В-третьих, сами балансиры как элементы выравнивания усилий в канатах работают плохо из-за значительных сопротивлений в шарнирах, допускают наличие разности усилий в сопряженных канатах до 15–20% и более [7]. Ход балансира, а, следовательно, и эффективность выравнивания нагрузки ограничены.

Известно, например, что при движении подъемного сосуда в стволе балансиры проворачиваются рывками, сопровождающимися акустическим эффектом выстрела. Это результат действия сил сухого трения. Возрастающая по мере перемещения сосуда в стволе разность натяжений канатов, прикрепленных с двух сторон к балансиру, достигает предела преодоления сил трения в шарнире, происходят срыв и мгновенный поворот балансира. Вследствие рывка возникают продольные волны в упругой системе.

Указанное явление отрицательно не только с позиции неудовлетворительного распределения нагрузки между канатами, но и пагубно отражается на долговечности футеровки канатопроводящего шкива трения, так как при этом происходит внезапное проскальзывание нагруженного каната по шкиву при высоких удельных давлениях. В результате образуются лыски и нарушается концентричность окружности навивки [8].

Следовательно, уравнильные и комбинированные системы подвески по эффективности выравнивания усилий в канатах приближаются к безуровневой системе.

Таким образом, опытом эксплуатации установлена неэффективность уравнильных систем при значительных затратах времени на их обслуживание и ремонт. Существенное увеличение числа элементов уравнильных подвесных устройств предопределяет снижение надежности и рост стоимости в сравнении с безуровневыми устройствами.

Вместе с тем была доказана возможность решения проблемы распределения нагрузки между канатами и без применения уравнильных систем – путем установления допусков отклонений усилий в канатах [1,7] и контроля за их соблюдением в процессе работы подъемной установки.

Вначале за рубежом, а затем и в нашей стране стали применяться и уже давно применяются безуровневые подвесные устройства. Современные подвесные устройства оснащаются измерительными элементами в местах присоединения канатов и механизмом изменения длин канатов.

Из приведенного анализа следует, что в процессе эксплуатации многоканатных подъемных установок со шкивами трения могут возникать значительные различия в натяжениях канатов при любых типах подвесных устройств. Поэтому безопасная эксплуатация этих установок не может быть обеспечена без систематического контроля распределения нагрузки и выравнивания усилий в канатах.

Наиболее простым способом автоматического выравнивания натяжений канатов фрикционных подъемников является способ футерования приводных шкивов упругими футеровочными материалами.

Упругие свойства таких материалов позволяют обеспечить частичное выравнивание радиусов навивки канатов за счет значительных радиальных деформаций футеровки, пропорциональных усилию в канате.

Теоретические и экспериментальные исследования, приведенные в работе [9], показали, что выравнивающий эффект упругой футеровки может быть довольно существенным.

Относительная погрешность ε при вычислении усилий в канатах без учета упругих свойств футеровки для конца цикла подъема, где она является наибольшей, определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{G_k}{G_f} \ln \frac{H_o}{h_o},$$

где G_k – жесткость канатов, принимаемая для всех канатов одинаковой; G_f – жесткость футеровки; H_o – длина отвеса ветви каната при нижнем положении сосуда; h_o – длина отвеса ветви каната при верхнем положении сосуда.

При металлической футеровке $\varepsilon = 0,05 - 0,11\%$; при деревянной – $\varepsilon = 0,6 - 1,3\%$, т.е. в этих случаях погрешность весьма мала и может не приниматься во внимание при расчетах усилий.

Совершенно иную картину представляет собой распределение усилий при футеровке шкива трения резиной или прорезиненной тканью. Нагрузка распределяется между канатами равномернее, перегрузки значительно меньше, чем при жесткой футеровке.

Таким образом, применение футеровки из резины или прорезиненной ткани может дать значительное выравнивание усилий, что подтверждено опытом эксплуатации. Однако этот способ самостоятельно не может обеспечить полного выравнивания натяжений канатов. При применении упругих футеровок частично компенсируются различия в радиусах навивки канатов. Различия длин канатов не компенсируются, и перегруз может достигать сверхнормативных значений. Это обстоятельство также указывает на необходимость периодического контроля и регулировки натяжений канатов.

Ниже указаны наиболее известные способы контроля распределения нагрузки между канатами.

Наибольшее распространение на шахтах получил волновой способ контроля натяжений канатов, рекомендованный ПАО «Донецгормаш», изготавливающим многоканатные подъемные машины, который заимствовал его из опыта шведской фирмы ASEA.

Сущность этого способа заключается в следующем. Волна поперечных колебаний, возбужденная в верхней части каната, движется вниз, отражается в точке закрепления каната с концевым грузом и возвращается обратно. Момент возвращения волны фиксируется визуально или по наибольшему толчку, ощущаемому приложенной к канату рукой. Измеряя время распространения волны, определяют концевую нагрузку на канат по следующей формуле [10,11]:

$$P_{ni} = q \left(\frac{4H^2}{gT_i^2} + \frac{gT_i^2}{64} - \frac{H}{2} \right), \quad (i=1,2,\dots,n),$$

где H – расстояние от места возбуждения колебаний каната до подъемного сосуда, м; T_i – время, за которое волна колебаний пробегает по i -му канату путь, равный $2H$ м; q – погонный вес каната, кгс/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; n – число канатов в ветви.

После определения нагрузок на все канаты ветви вычисляют среднюю нагрузку

$$P_{н.ср.} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{oi}.$$

Относительная нагрузка каждого каната определяется по формуле

$$\Delta P_{отн.i} = \frac{P_{Hi} - P_{н.ср.}}{P_{н.ср.}} \cdot 100\%.$$

Величина укорочения канатов находится из следующего выражения:

$$\Delta L_i = \frac{H_0}{2EF} (P_{ni} - P_{н.ср.}),$$

где E – модуль упругости каната, мПа; F – площадь сечения проволок каната, м².

Основное достоинство волнового способа – его простота. Действительно, измерение времени прохождения волн колебаний на четырехканатной подъемной установке производится одним человеком за 2-3 минуты.

Основным недостатком этого способа следует считать то, что при небольшой длине отвеса каната им нельзя воспользоваться из-за большой погрешности в измерении времени

распространения волн. Измерение времени распространения волн поперечных колебаний в канатах производится обычным механическим секундомером. При этом из-за несовпадения моментов возбуждения волн колебаний и включения секундомера, моментов возвращения волны и выключения секундомера, а также моментов возвращения волны и выключения секундомера, влияния других причин ошибка в измерениях получается значительной.

Макеевский НИИ по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ) разрешил применение волнового способа при длине канатов не менее 500 м [10].

По рекомендации шведской фирмы ASEA и инструкции TH1-125-63 завода-изготовителя (ПАО «Донецкгормаш») измеренные отрезки времени для канатов ветви не должны отличаться более чем на 10%.

Эта рекомендация не учитывает особенностей конкретной подъемной установки. Проверками установлено, что ее применение приводит к перегрузкам канатов, значительно превышающим установленные нормы.

В настоящее время волновой способ является основным, применяющимся на шахтах Украины для контроля натяжения канатов при нижнем положении подъемного сосуда. По результатам измерений времени распространения волны производят выравнивание длин канатов. При этом величины укорочения канатов находятся по приведенной выше зависимости.

Выравнивание радиусов навивки производят известным методом помеченных сечений канатов [12].

Существует два типа динамометров для измерения усилий в канатах – накладные и встроенные непосредственно в подвесное устройство каждого каната.

Встроенные в силовую цепь динамометры постоянно находятся под нагрузкой, и поэтому с течением времени может изменяться их характеристика и возрастать погрешность измерения. Кроме того, установка динамометра в подвесное устройство усложняет его конструкцию, увеличивает габариты подвесного устройства. Затрудняются поверка, обслуживание и ремонт динамометра при необходимости его демонтажа.

Принцип действия создававшихся ранее накладных динамометров основывался на зависимости между усилием натяжения каната и усилием его поперечного отжима в середине участка фиксированной длины.

К накладным динамометрам предъявляются следующие требования: характеристика динамометра должна быть линейной, стабильной и однозначной; конструкция должна обеспечивать простоту монтажа и демонтажа, легкость обслуживания.

Несмотря на множество выполненных ранее работ, направленных на определение оптимальных конструктивных параметров динамометров для измерения усилий в стальных канатах [4,13], до последнего времени не удавалось создать динамометры, которые удовлетворяли бы требованиям практики. Основными недостатками разрабатываемых ранее устройств являются большая погрешность измерений и нестабильность характеристик.

Таким образом динамометрический способ контроля натяжений канатов не получил ранее широкого распространения из-за отсутствия качественных динамометров.



Рис. 1. Устройство для измерений усилий в головных канатах рудничных многоканатных подъемных установок фирмы TEMIX

В последнее время появились новые силоизмерительные устройства, преобразующие величину усилия в электрический сигнал. Известны и применяются устройства фирмы TEMIX (рис. 1) для периодических измерений усилий в головных канатах рудничных многоканатных подъемных установок с вкладышами измерения силы, постоянно зафиксированными в подвесках сосудов [14].

Появление таких устройств создало технические возможности для реализации системы непрерывного мониторинга сил в головных канатах многоканатной подъемной установки, в которой управление измерительными функциями и передача измерительных данных от сосуда осуществляется по радио во время нормального рабочего цикла подъемной установки. На рис. 1 приведены графики усилий в канатах многоканатной подъемной установки ствола III шахты «Щигловице» (Польша) до регулировки распределения нагрузки, на рис. 2 – после регулировки радиусов навивки путем проточки футеровки, на рис. 3 – после регулировки длин канатов [14].

Анализ представленных графиков показывает, что выполненные регулировки позволили сократить неравномерность распределения нагрузки между канатами. Тем не менее, при движении сосудов в стволе происходит перераспределение нагрузки между канатами, и канаты нагружены неравномерно. Очевидно, что параметры регулировки (разность радиусов навивки и разность длин канатов) определены недостаточно точно. Чтобы по результатам непрерывного мониторинга усилий в канатах выполнить правильно регулировку

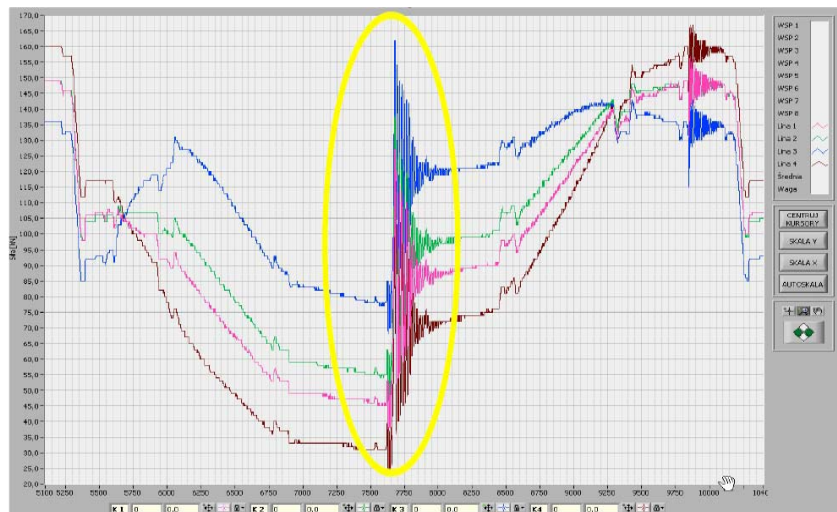


Рис. 2. Графики усилий при выполнении рабочего цикла подъема до регулировки распределения нагрузки между канатами



Рис. 3. Графики усилий при выполнении рабочего цикла подъема после регулировки радиусов навивки канатов



Рис. 4. Графики усилий при выполнении рабочего цикла подъема после регулировки длин канатов

распределения нагрузки между канатами, необходимо иметь алгоритм расчета параметров регулировки.

Неравномерность натяжений канатов возникает в основном из-за неизбежных различий их длин, продольных жесткостей и радиусов навивки по шкиву трения. В силу особых требований, предъявляемых к выбору головных канатов при их навеске [15], неравномерность распределения нагрузки между ними из-за различий их жесткостей составляет обычно порядка 2-3% [1]. Поэтому можно пренебречь различиями жесткостей канатов и считать, что имеются только различия длин и радиусов навивки канатов, нарушающие равномерное распределение концевой нагрузки между ними. Для нормальной работы подъемной установки перегруз одного из канатов при нижнем положении подъемного сосуда не должен превышать 15% [16].

Влияние разности радиусов навивки и длин канатов на отклонение усилий от среднего значения в набегающей δP_{1i}^{cm} и сбегаящей δP_{2i}^{cm} ветвях канатов соответственно описывается следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm} &= A \left[\frac{\delta R_i}{R} \left(-\frac{h_r}{L} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z} \right) - \frac{\delta l_i}{L} \right]; \\ \delta P_{2i}^{cm} &= -A \left[\frac{H+h_r-z}{h_r+z} \cdot \frac{\delta R_i}{R} \left(-\frac{h_r}{L} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z} \right) + \frac{\delta l_i}{L} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1);$$

где A – агрегатная продольная жесткость каната; δR_i – отклонение i -го радиуса ручья от среднего радиуса R ; z – координата, определяющая положение подъемного сосуда в стволе шахты; H – высота подъема; h_r – расстояние от разгрузки до оси приводного шкива машины; $L = H + 2h_r$.

Влияние разности длин канатов в навеске определим, положив $\delta R_i = 0$.

Из (1) находим

$$\left. \begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm} &= -A \frac{\delta l_i}{L} = -A \frac{\delta l_i}{H + 2h_r}; \\ \delta P_{2i}^{cm} &= -A \frac{\delta l_i}{L} = -A \frac{\delta l_i}{H + 2h_r}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Анализ полученных выражений показывает, что в случае равенства радиусов навивки канатов и отличия длин канатов отклонения усилий в ветвях канатов сохраняют постоянные значения и не зависят от направления движения сосудов и их местоположения в стволе.

Влияние разности радиусов навивки проанализируем, положив $\delta l_i = 0$.

Из (1) находим

$$\left. \begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm} &= A \frac{\delta R_i}{R} \left(-\frac{h_r}{L} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z} \right); \\ \delta P_{2i}^{cm} &= -A \frac{\delta R_i}{R} \frac{H+h_r-z}{h_r+z} \left(-\frac{h_r}{L} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z} \right). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из соотношений (3) следует, что в стационарном режиме отклонения приращений усилий в канатах не просто линейно зависят от $\delta R_i/R$, но и пропорциональны этим величинам. Для анализа δP_{1i}^{cm} и δP_{2i}^{cm} применительно к (3) рассмотрим функции

$$\left. \begin{aligned} f_1(z) &= -\frac{h_r}{H+2h_r} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z}; \\ f_2(z) &= -\frac{H+h_r-z}{h_r+z} \left(-\frac{h_r}{H+2h_r} \ln \frac{H+h_r}{h_r} + \ln \frac{H+h_r}{H+h_r-z} \right), \end{aligned} \right\}$$

которые в обозначениях $\xi = z/H$ и $a = h_r/H$ запишем в безразмерной форме, т.е.

$$\left. \begin{aligned} f_1(\xi) &= -\frac{a}{1+2a} \ln \frac{1+a}{a} + \ln \frac{1+a}{1+a-\xi}; \\ f_2(\xi) &= -\frac{1+a-\xi}{a+\xi} \left(-\frac{a}{1+2a} \ln \frac{1+a}{a} + \ln \frac{1+a}{1+a-\xi} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В принятых обозначениях выражения (3) приобретут вид

$$\delta P_{1i}^{cm} = A \frac{\delta R_i}{R} f_1(\xi), \quad \delta P_{2i}^{cm} = A \frac{\delta R_i}{R} f_2(\xi). \quad (5)$$

На рис. 5 изображены графики безразмерных функций неравномерности распределения нагрузки между канатами (4) для двух граничных значений параметра a : $a=0,05$ (кривые 1, 3) и $a=0,02$ (кривые 2, 4). При этом кривые 1, 2 соответствуют функции f_1 (сосуд поднимается), а кривые 3, 4 – функции f_2 (сосуд опускается). За начало координаты z поднимающегося сосуда принимается крайнее нижнее положение подъемного сосуда, а опускающегося сосуда – крайнее верхнее положение, соответственно и безразмерной координаты $\xi = z/H$. Крайнее нижнее положение поднимающегося сосуда имеет безразмерную координату $\xi=0$, а крайнее верхнее – $\xi=1$. Для опускающегося сосуда – наоборот.

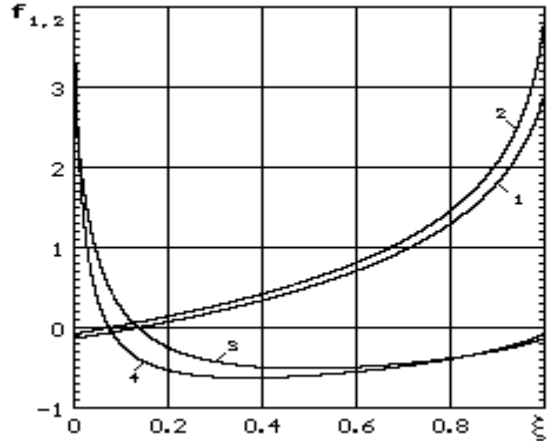


Рис. 5. Графики функций пропорциональности распределения нагрузки между канатами

Анализируя графики (рис. 5), видим, что неравномерность распределения нагрузки между канатами, вызываемая разницей в радиусах их навивки, достигает максимального значения при нахождении любого из сосудов в крайнем верхнем положении. При движении сосуда вверх функция неравномерности распределения нагрузки $f_1(\xi)$ возрастает, интенсивность роста увеличивается по мере приближения сосуда к крайнему верхнему положению.

При отходе от верхней приемной площадки движущегося вниз сосуда неравномерность распределения нагрузки резко уменьшается на небольшом участке пути движения, затем функция неравномерности распределения нагрузки $f_2(\xi)$ меняет знак и изменяется в небольших пределах.

На интервале изменения координаты $0 \leq \xi \leq 1$ функции $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ пересекаются с осью абсцисс, т.е. имеются точки, в которых при любой разности радиусов их влияние на распределение нагрузки между канатами отсутствует. В этих точках неравномерность распределения нагрузки зависит только от разницы длин канатов.

Приравняв к нулю функции $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ и решив полученные уравнения, определим координаты этих точек, т.е.

$$\begin{aligned} \xi_{f_1} &= \left(1 - \left(\frac{a+1}{a} \right)^{\frac{-a}{2a+1}} \right) (a+1); \\ \xi_{f_2} &= \left(1 - \left(\frac{a+1}{a} \right)^{\frac{-a}{2a+1}} \right) (a+1). \end{aligned} \quad (6)$$

Тождественность полученных выражений указывает на то, что $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ пересекаются с осью ξ в одной точке. Следовательно, влияние разницы радиусов навивки канатов на распределение усилия между ними в набегающей и сбегаящей ветвях нивелируется одновременно в одной точке ствола.

Для существующих подъемов a находится в пределах от 0,02 до 0,05. При этом координата точки пересечения функций ξ изменяется соответственно от 0,074 до 0,136.

Например, при высоте подъема $H=1000$ м, $a=0,05$ нагрузки между канатами выравниваются независимо от разницы в радиусах навивки канатов на расстоянии 136 м от крайних положений сосудов.

В середине высоты подъема ($\xi=0,5$) функции $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ равны по величине и противоположны по знаку.

Выявленные свойства функций могут быть использованы при разработке алгоритмов расчета параметров регулировки по результатам контроля натяжения канатов.

При навеске новых канатов стремятся обеспечить равенство длин всех канатов и равенство радиусов их навивки. Но в силу естественных, чисто технических причин практически невозможно добиться строгого равенства $\delta R_i = 0$, следовательно, для тех ручьев, в которых $\delta R_i > 0$, приращения натяжений канатов будут возрастать. А так как суммарный износ футеровки за один цикл подъема пропорционален квадрату натяжения каната [1, 2], то скорость износа в таких ручьях будет большей, чем в остальных. И это будет происходить до тех пор, пока радиусы навивки канатов не выравняются и натяжения во всех канатах станут практически одинаковыми, то есть произойдет своего рода процесс выравнивания радиусов навивки и усилий. В работе «Безуровнительный многоканатный подъем» П.П.Нестерова, Ю.П.Шабанова-Кушнаренко, Н.К.Гончаренко показано, что самовыравнивание нарушается, если один из радиусов навивки канатов многоканатной машины значительно меньше других. В этом случае происходит интенсивный прогрессирующий износ футеровки желоба с наименьшим радиусом. Такая ситуация может возникнуть при неправильной регулировке радиусов навивки.

На практике известно множество случаев, когда даже при правильной регулировке в процессе эксплуатации нарушается равномерность распределения нагрузки и наблюдается интенсивный износ отдельных ручьев футеровки приводного шкива. Объясняется это влиянием разности собственных длин канатов. Как показано выше (2), отклонения усилий в канатах, вызываемые различиями их длин, не зависят от положения сосуда в стволе шахты, а распределение нагрузки между канатами происходит одинаково как в цикле подъема, так и в цикле спуска сосуда. Наиболее короткие канаты оказываются более нагруженными, и износ футеровки под ними более интенсивный за счет относительно больших удельных давлений канатов на футеровку. Этим объясняется нарушение автоматического выравнивания нагрузки между канатами.

Выводы.

1. В случае равенства радиусов навивки канатов и отличия их длин отклонения усилий в канатах от их среднего значения на поднимающейся и опускающейся ветвях пропорциональны разности длин.

2. В установившемся режиме неравномерность распределения нагрузки между канатами, обусловленная разницей их длин, не зависит от местоположения сосудов в стволе и направления их движения.

3. В набегающей и сбегающей ветвях при установившемся режиме отклонения усилий в канатах от среднего значения равны произведению отклонений радиусов навивки от их среднего значения на функции неравномерности распределения нагрузки между канатами

$$\delta P_{1i}^{cm} = A \frac{\delta R_i}{R} f_1(\xi), \quad \delta P_{2i}^{cm} = A \frac{\delta R_i}{R} f_2(\xi).$$

4. Неравномерность распределения нагрузок, вызываемая различием радиусов навивки канатов, возрастает по мере движения сосуда вверх и достигает максимальной величины при нахождении сосуда (поднимающегося или опускающегося) в крайнем верхнем положении.

5. В середине высоты подъема ($\xi=0,5$) функции $f_1(\xi)$ и $f_2(\xi)$ равны по величине и противоположны по знаку, т.е. на середине высоты подъема степень неравномерности распределения нагрузки в набегающей и сбегающей ветвях канатов одинаковая.

6. На интервале изменения координаты $0 \leq \xi \leq 1$ имеется точка, в которой при любой разности радиусов их влияние на распределение нагрузки между канатами отсутствует.

Координата этой точки определяется выражением $\xi = \left(1 - \left(\frac{a+1}{a} \right)^{\frac{-a}{2a+1}} \right) (a+1)$.

При разработке алгоритмов расчета параметров регулировки длин канатов используем установленные ранее закономерности, описывающие отклонения усилий в канатах поднимающейся и опускающейся ветвей от их средних значений при перемещении сосудов в стволе шахты (1). Перейдя к безразмерным координатам $\xi = \frac{z}{H}$, $a = \frac{h_r}{H}$, запишем формулы (1) в виде

$$\left. \begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm}(\xi) &= A \left[\frac{\delta R_i}{R} \left(-\frac{h_r}{1+2a} \ln \frac{1+a}{a} + \ln \frac{1+a}{1+a-\xi} \right) - \frac{\delta l_i}{1+2a} \right]; \\ \delta P_{2i}^{cm}(\xi) &= -A \left[\frac{1+a-\xi}{a+\xi} \cdot \frac{\delta R_i}{R} \left(-\frac{a}{1+2a} \ln \frac{1+a}{a} + \ln \frac{1+a}{1+a-\xi} \right) + \frac{\delta l_i}{1+2a} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Формулы отклонения усилий в канатах, вызываемые различиями только их собственных длин ($\Delta R_i = 0$), в безразмерном виде имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm}(\xi) &= -A \frac{\delta l_i}{1+2a}; \\ \delta P_{2i}^{cm}(\xi) &= -A \frac{\delta l_i}{1+2a}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Как видно из формул (8), отклонения усилий в канатах, вызываемые различиями их длин, не зависят от положения сосуда в стволе шахты, а распределение нагрузки между канатами происходит одинаково как в цикле подъема, так и в цикле спуска сосуда.

При разработке алгоритма расчета разности длин канатов учтем, что регулирование длин возможно только укорочениями канатов, т.е. выравниванием с самым коротким канатом.

Устранение неравномерности распределения нагрузки, вызываемое различиями длин канатов, необходимо производить по результатам измерений усилий в канатах при нахождении подъемного сосуда в точке ствола с координатой $\xi = \left(1 - \left(\frac{a+1}{a} \right)^{\frac{-a}{2a+1}} \right) (a+1)$, где разность

радиусов навивки канатов не оказывает существенного влияния. С допустимой для практики ошибкой эти измерения можно производить при нижнем положении подъемного сосуда.

Используя формулы (8), определим величины необходимого укорочения канатов по известным величинам натяжения канатов P_i .

Рассмотрим разность отклонений длин i -го и j -го канатов. С учетом того, что $\delta l_i = L_i - L_{cp}$ и $\Delta P_i = P_i - P_{cp}$, получим

$$L_i - L_j = -\frac{1+2a}{A} (P_i - P_j). \quad (9)$$

Самый нагруженный канат (обозначим его j) является и самым коротким, т.е. $P_j = P_{\max}$, а $L_j = L_{\min}$, тогда $L_i - L_{\min}$ — это отрезки, на которые необходимо укоротить соответствующие канаты для выравнивания их длин с самым коротким канатом. Обозначим $L_i - L_{\min} = \delta L_i$. Тогда

$$\delta L_i = -\frac{1+2a}{A} (P_i - P_{\max}). \quad (10)$$

Таким образом, алгоритм выравнивания длин канатов сводится к следующему:

- измерить усилия в канатах при нахождении подъемного сосуда в точке ствола с координатой $\xi = \left(1 - \left(\frac{a+1}{a} \right)^{\frac{-a}{2a+1}} \right) (a+1)$;
- по полученным результатам определить наиболее нагруженный канат и обозначить усилие в нем P_{\max} ;
- пользуясь формулой (10), определить превышение длин канатов δL_i над самым коротким канатом. В случае $\delta L_i > \delta L_{\text{дон}}$ укоротить канат.

Перегруз любого из канатов при нижнем положении подъемного сосуда не должен превышать 15% [3].

Рассмотрим отклонения усилий в i -м канате в некоторых точках ξ_1 и ξ_2 при подъеме сосуда. Для этого в формулах (5) подставим соответственно ξ_1 и ξ_2 .

$$\begin{aligned} \delta P_{1i}^{cm}(\xi_1) &= A \frac{\delta R_i}{R} f_1(\xi_1); \\ \delta P_{2i}^{cm}(\xi_2) &= A \frac{\delta R_i}{R} f_2(\xi_2). \end{aligned}$$

Составим разность отклонений $\delta P_{1i}^{cm}(\xi_2) - \delta P_{1i}^{cm}(\xi_1)$, используя выражение (7)

$$f_1(\xi) = -\frac{a}{1+2a} \ln \frac{1+a}{a} + \ln \frac{1+a}{1+a-\xi} :$$

$$\delta P_{1i}^{cm}(\xi_2) - \delta P_{1i}^{cm}(\xi_1) = A \frac{\delta R_i}{R} \ln \frac{1+a-\xi_1}{1+a-\xi_2}. \quad (11)$$

Так как

$$(\delta P_{1i}^{cm})_{\xi_1} = (P_{1i}^{cm})_{\xi_1} - (P_{10}^{cm})_{\xi_1}, \quad \text{а} \quad (\delta P_{1i}^{cm})_{\xi_2} = (P_{1i}^{cm})_{\xi_2} - (P_{10}^{cm})_{\xi_2},$$

то
$$(\delta P_{1i}^{cm})_{\xi_2} - (\delta P_{1i}^{cm})_{\xi_1} = (P_{1i}^{cm})_{\xi_2} - (P_{1i}^{cm})_{\xi_1} - [(P_{10}^{cm})_{\xi_2} - (P_{10}^{cm})_{\xi_1}]. \quad (12)$$

Подставив (11) в (12), запишем

$$(P_{1i}^{cm})_{\xi_2} - (P_{1i}^{cm})_{\xi_1} - [(P_{10}^{cm})_{\xi_2} - (P_{10}^{cm})_{\xi_1}] = A \frac{\delta R_i}{R} \ln \frac{1+a-\xi_1}{1+a-\xi_2}. \quad (13)$$

Решив уравнение (13) относительно δR_i , получим

$$\delta R_i = \frac{R}{A} \cdot \frac{(P_{1i}^{cm})_{\xi_2} - (P_{1i}^{cm})_{\xi_1} - [(P_{10}^{cm})_{\xi_2} - (P_{10}^{cm})_{\xi_1}]}{\ln \frac{1+a-\xi_1}{1+a-\xi_2}}. \quad (14)$$

Зная усилия в канатах, с помощью формулы (14) можно вычислить отклонения радиусов наливки всех канатов ветви δR_i .

Таким образом, для определения δR_i необходимо выполнить следующее:

- сделать 2-3 перегона порожних сосудов для достижения установившегося распределения усилий в канатах;
- поднять подъемный сосуд в заданную точку A и измерить усилия P_{1iA}^{cm} в канатах ветви; продолжить подъем подъемного сосуда до некоторой заданной точки B и сделать то же самое, определив P_{1iB}^{cm} ;
- используя формулу (14), определить отклонения радиусов наливки канатов δR_i ;
- сравнить каждое δR_i с допустимой разницей в радиусах наливки канатов $\delta R_{\text{дон}}$. Если $\delta R_i > \delta R_{\text{дон}}$, то проточить футеровку соответствующего ручья на величину δR_i .

Для упрощения проверки радиусов навивки канатов приведенным выше способом рекомендуется за точку A принять нижнее положение сосуда (т.е. $\xi_1 = 0$), а за точку B - середину высоты подъема (т.е. $\xi_2 = 0,5$).

Аналогичным образом можно получить алгоритм определения разности радиусов навивки канатов по результатам измерений усилий в канатах в заданной точке ствола при движении сосуда из крайнего верхнего положения вниз и из крайнего нижнего положения вверх.

Приведем последовательность операций по определению различий в радиусах навивки канатов:

- сделать 2-3 цикла подъема с порожними подъемными сосудами для достижения установившегося распределения усилий в канатах;
- порожний подъемный сосуд установить в верхнее положение;
- опустить этот сосуд в заданную точку ствола A ;
- измерить и зафиксировать усилия P_{2i}^{cm} в канатах ветви;
- опустить подъемный сосуд в нижнее положение;
- поднять подъемный сосуд снова в точку A ;
- зафиксировать усилия P_{1i}^{cm} в канатах ветви;
- определить отклонения радиусов навивки канатов ΔR_i по формуле (15)

$$\delta R_i = \frac{R}{A} \cdot \frac{(P_{2i}^{cm})_{\xi_A} - (P_{1i}^{cm})_{\xi_A} - [(P_{20}^{cm})_{\xi_A} - (P_{10}^{cm})_{\xi_A}]}{\ln \frac{1+a-\xi_A}{1+a-\xi_A}}$$

- найти минимальное ΔR_{\min} по формуле $\delta R_i = \Delta R_i - \Delta R_{\min}$, вычислить искомые различия радиусов;
- сравнить δR_i с допусковой разницей в радиусах навивки канатов δR_{don} .

Если δR_i меньше δR_{don} , то проточка футеровки не требуется. В противном случае необходимо выравнивание радиусов навивки канатов проточкой соответствующих ручьев футеровки.

Выводы. Разработанные алгоритмы позволяют создать систему автоматического непрерывного контроля распределения нагрузки между головными канатами многоканатных подъемных установок и определения параметров регулировки радиусов навивки и длин канатов, что позволит сократить время на техническое обслуживание подъемной установки и повысить эффективность контроля.

Литература

1. Нестеров П.П. Безуровневый многоканатный подъем: Монография / П.П.Нестеров. – К.: Гостехиздат, 1963. – 475 с.
2. Гаркуша Н.Г. Подвесные устройства шахтных подъемных сосудов / Н.Г.Гаркуша, Л.В.Колосов, А.Н.Обухов. – М.: Недра, 1980. – 105 с.
3. Люблинский К.И. Совершенствование подвесных устройств сосудов многоканатного подъема / К.И.Люблинский, Л.Т.Максимов, П.С.Карпович // Уголь. – 1976. – №7. С. 48-49.
4. Найденко И.С. Шахтные многоканатные подъемные установки / И.С.Найденко, В.Д.Белый. – М.: Недра, 1979. – 312 с.
5. Шматков А.А. Расчет и проектирование уравнильных устройств для многоканатных подъемов. Многоканатный подъем в горной промышленности: Монография / А.А.Шматков. – М.: Углетехиздат, 1960. – 208 с.
6. Бер З. Контроль натяжений в канатах многоканатных подъемных установок / З.Бер // Глюкауф. – 1973. – № 21. – М.: Недра. – С. 22-34.
7. Шабанов-Кушнаренко Ю.П. Применение упругих футеровок на многоканатных шкивах трения. Многоканатный подъем / Ю.П.Шабанов-Кушнаренко. – М.: Углетехиздат, 1958. – С. 153-166.
8. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок: РТМ 07.01.012-79 / ВНИИГМ им. М.М.Федорова. – М.: Недра, 1978. – 39 с.
9. Руководство по контролю и регулировке распределения нагрузки между головными канатами многоканатных подъемных установок: РТМ 07.01.015-82 / ВНИИГМ им. М.М.Федорова. – Донецк, 1982.
10. Шматков А.А. Приборы для измерения и контроля натяжений канатов многоканатных подъемных установок / А.А.Шматков, Н.Г.Гаркуша // Угольная промышленность. – 1962. – №5. – К.: ИТИ УССР, 1962.
11. Правила технической эксплуатации угольных шахт: СОУ 10.1-00185790-002-2005. – К.: Госстандарт Украины, 2005. – 354 с.
12. Правила безопасности в угольных шахтах: ДНАОП 1.1.30-1.01.-10. - Х.: Изд-во «Форт», 2010. – 256 с.

*Статья рекомендована к публикации
канд. техн. наук Пристромом В.А.*