

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ГОРНОЙ ПОРОДЫ
НА ПАРАМЕТРЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

Приведені результати досліджень впливу розміру часток гірської породи, що транспортується, на параметри пневмотранспортування. Отримані залежності для визначення швидкості пневмотранспортування та витрат стислого повітря від розміру часток матеріалу, що транспортується, з урахуванням параметрів пневмотранспортної системи.

**INFLUENCE OF SIZE OF PARTICLES OF MOUNTAIN BREED
ON PARAMETERS OF PNEUMATIC PORTAGE**

The brought results over of researches of influence of size of parts of mountain breed that is transported, on the parameters of pneumatic portage. The got dependences are for determination of speed of pneumatic portage and charges of the compressed air from the size of parts of material that is transported, taking into account the parameters of the pneumatic portage system.

Одной из отличительных особенностей пневмотранспортирования горной породы является необходимость учета ее кусковатости (гранулометрического состава). Кусковатость характеризуется линейными размерами кусков насыпного груза, замеряемыми по трем взаимно перпендикулярным направлениям, при этом в одном из этих направлений размер куска должен быть максимальным [1].

Ориентировочно значение средней скорости воздушного потока при пневмотранспортировании горной породы по горизонтальному трубопроводу может быть определено по эмпирической формуле [2]

$$u_{cp}^e = A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2, \quad (1)$$

где u_{cp}^e – осредненное по сечению транспортного трубопровода значение скорости воздушного потока; A – коэффициент, зависящий от крупности частиц транспортируемого материала; ρ_m – насыпная плотность транспортируемого материала в т/м³; B – опытный коэффициент, L_{mp} – длина транспортного трубопровода.

Значение коэффициента B находится в диапазоне от $2 \cdot 10^{-5}$ (для пылевидных сухих материалов) до $5 \cdot 10^{-5}$ [2]. При этом для насыпных грузов принята следующая классификация: пылевидные материалы – это частицы с размерами менее 0,05 мм, порошкообразные – от 0,05 мм до 0,5 мм, зернистые – от 0,5 мм до 10 мм, мелкокусковые – от 10 мм до 60 мм, среднекусковые – от 60 мм до 160 мм и крупно-кусковые – более 160 мм [1]. Учитывая диапазон изменения коэффициента B , при расчете параметров пневмотранспортирования горной породы вполне приемлемо использовать значение $B = 5 \cdot 10^{-5}$.

На рис. 1 представлена графическая зависимость коэффициента A от диаметра пневмотранспортируемого материала d , построенная с использованием табличных данных, приведенных в работе [2].

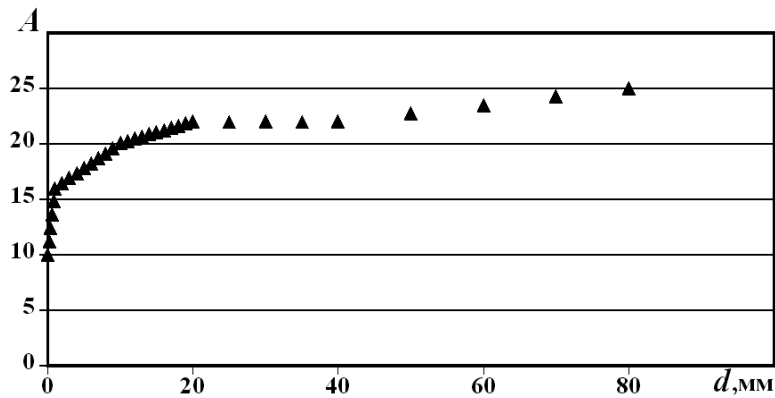


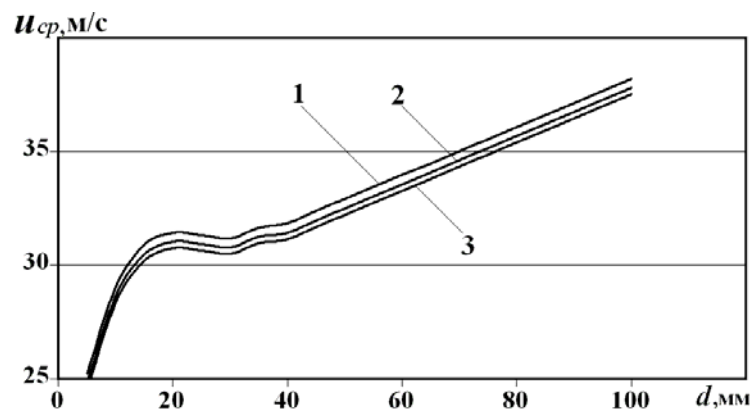
Рис. 1 – Зависимость коэффициента A от диаметра частиц транспортируемого материала

Как видно из приведенного на рис. 1 графика, с коэффициентом аппроксимации R^2 , близким к единице, можно утверждать, что зависимость коэффициента A от диаметра частиц пневмотранспортируемого материала имеет вид

$$A = 0,0006d^3 - 0,0454d^2 + 1,1253d + 12,821 - \text{для } 0 < d < 40 \text{ мм } (R^2 = 0,93); \quad (2)$$

$$A = 0,075d + 19 - \text{для } 40 \leq d < 100 \text{ мм } (R^2 = 1). \quad (3)$$

На рис. 2 представлены расчетные графические зависимости средней скорости u_{cp} воздушного потока при пневмотранспортировании сыпучих материалов, в том числе вмещающих горных пород, с насыпной плотностью $\rho_m = 2,0 \text{ т/м}^3$ [1, 3] от размера перемещаемых частиц, построенные по формуле (1) для различных длин транспортного трубопровода при $B = 5 \cdot 10^{-5}$ с использованием равенств (2) и (3).



Длины транспортного трубопровода 120 м (1); 80 м (2) и 40 м (3)

Рис. 2 – Зависимость средней скорости воздушного потока от диаметра частиц горной породы при их пневмотранспортировании

Как видно из графиков на рис. 2, средняя скорость воздушного потока при пневмотранспортировании мелкокусковой горной породы (диаметром частиц от 10 мм до 60 мм) находится в диапазоне от 28 м/с до 34 м/с, а среднекусковой (диаметром частиц от 60 мм до 100 мм) – от 33 м/с до 40 м/с в зависимости от

длины транспортного трубопровода. Полученные значения средней скорости воздушного потока при пневмотранспортировании находятся в соответствии с результатами экспериментальных исследований, приведенных в работе [4]. При этом, как следует из графиков, увеличение длины транспортного трубопровода на 40 м обуславливает необходимость повышения средней скорости пневмотранспортирования от 1 % до 2 %.

Одними из основных параметров пневмотранспортирования твердого материала являются массовая (весовая) или объемная концентрация перемещаемой аэросмеси, скорости несущей (воздушной) и несомой среды (твердого материала), а также расходы воздуха и транспортируемого материала. Основными конструктивными параметрами пневмотранспортной системы являются диаметр и длина транспортного трубопровода с учетом поворотных колен и участков подъема.

На выбор диаметра транспортного трубопровода, который непосредственно влияет на расходные характеристики потока аэросмеси, помимо обеспечения требуемой концентрации перемещаемого потока аэросмеси в первую очередь влияет кусковатость транспортируемого материала. В теории пневмотранспортирования для определения диаметра транспортного трубопровода пневмотранспортных установок используются различные зависимости, однако при этом расчетное значение диаметра транспортного трубопровода необходимо в обязательном порядке проверять на пропускную способность по максимальному диаметру частиц транспортируемого материала [1, 4, 5]:

$$D_{mp} \geq K_d d_{max}, \quad (4)$$

где D_{mp} – диаметр транспортного трубопровода; K_d – коэффициент, выбираемый в пределах от 2 до 3; d_{max} – максимальный размер частиц транспортируемого материала.

Для оценки влияния размера частиц пневмотранспортируемого материала на расходные характеристики подводимого сжатого воздуха воспользуемся уравнением объемного секундного расхода, записанного для трубопровода круглого сечения [1–2, 4–6]:

$$Q_v = u_{cp}^e \frac{\pi D_{mp}^2 (1 - \alpha_{mp})}{4}. \quad (5)$$

где Q_v – объемный секундный расход сжатого воздуха; α_{mp} – коэффициент заполнения проходного сечения транспортного трубопровода перемещаемым материалом.

Коэффициент α_{mp} в равенстве (5) характеризует проницаемость воздушным потоком перемещаемого твердого материала, численное значение которой находится в диапазоне от нуля до единицы и может быть определено как [3, 6]

$$\alpha_{mp} = 1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_k}, \quad (6)$$

где γ_n – насыпной удельный вес транспортируемого материала; γ_k – кажущийся удельный вес транспортируемого материала, которые связаны с объемными плотностями через соотношения:

$$\gamma_n = g\rho_m; \quad \gamma_k = g\rho_m^0, \quad (7)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; ρ_m^0 – кажущееся (объемная) плотность транспортируемого материала.

Воспользовавшись равенствами (1) и (7), а, также принимая в соотношении (4) знак равенства, зависимость (5) представим в следующем виде

$$Q_g = \frac{\pi(K_d d_{max})^2}{4} \frac{\rho_m}{\rho_m^0} (A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2). \quad (8)$$

Коэффициент массовой (весовой) концентрации, который для предотвращения закупорок транспортного трубопровода перемещаемым сыпучим материалом принимается не более 20 [4, 5, 7], определяется как

$$\mu_m = \frac{G_m}{G_g} = \frac{\rho_m Q_m}{\rho_g Q_g}, \quad (9)$$

где G_m – массовый секундный расход транспортируемого материала; G_g – массовый секундный расход сжатого воздуха; Q_m – объемный секундный расход транспортируемого материала; ρ_g – плотность воздушного потока.

Воспользовавшись равенством (8) из соотношения (9) получим

$$Q_m = \mu_m \frac{\rho_g}{\rho_m^0} \frac{\pi(K_d d_{max})^2}{4} (A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2). \quad (10)$$

Для движения аэросмеси, которая состоит из воздуха и транспортируемого твердого материала, по трубопроводу круглого сечения справедливо следующее соотношение

$$Q_g + Q_m = v_{cp}^a \frac{\pi D_{mp}^2}{4},$$

где v_{cp}^a – осредненное по сечению транспортного трубопровода значение скорости движения аэросмеси, которую условно можно рассматривать как ско-

рость перемещения транспортируемого материала.

Из последнего равенства с учетом соотношений (4), (8) и (10) следует:

$$v_{cp}^a = \frac{\rho_m + \mu_m \rho_g}{\rho_m^0} \left(A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2 \right). \quad (11)$$

Введя понятие коэффициента разрыхления $k_{раз}$, которое характеризует отношение объемной массы к насыпной $k_{раз} = \frac{\rho_m^0}{\rho_m}$, равенства (8), (10) и (11) можно представить в виде

$$Q_g = \frac{\pi(K_d d_{max})^2}{4k_{раз}} \left(A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2 \right).$$

$$Q_m = \mu_m \frac{\rho_g}{k_{раз} \rho_m} \frac{\pi(K_d d_{max})^2}{4} \left(A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2 \right).$$

$$v_{cp}^a = \frac{1 + \mu_m \frac{\rho_g}{\rho_m}}{k_{раз}} \left(A\sqrt{\rho_m} + BL_{mp}^2 \right).$$

Коэффициент разрыхления и насыпная плотность, прежде всего зависят, от гранулометрического состава разрыхленной массы и взаимного расположения кусков твердого материала [3]. Поэтому в зависимости от способа разрушения горного массива, физико-механических и некоторых других свойств разрушаемого массива, коэффициент разрыхления может меняться от 1,1 – 1,4 (мягкие горные породы и угли) до 1,6 – 1,8 (весьма крепкие скальные породы) [1].

На рис. 3 представлены расчетные зависимости скорости движения пневмотранспортируемой аэросмеси, расходов воздуха и материала от размеров частиц транспортируемой углевмещающей породы (илистого сланца, песчанистого сланца, алевролита, песчаника, известняка со средним значением объемной плотности $\rho_m^0 = 2480 \text{ кг/м}^3$ [3]). Графики построены по формулам (8), (10) и (11) с учетом равенств (2) и (3) при следующих начальных параметрах: $k_{раз} = 1,3$; $\rho_g = 1,3 \text{ кг/м}^3$; $\rho_m = 1888 \text{ кг/м}^3$; $B = 5 \cdot 10^{-5}$; $L_{mp} = 100 \text{ м}$; $K_d = 2,5$ и $\mu_m = 15$.

Как следует из построенных расчетных зависимостей, при пневмотранспортировании частиц горной породы диаметром 80 мм при заданном режиме транспортирования $\mu_m = 15$ по трубопроводу круглого сечения диаметром 0,2 м на расстояние 100 м необходимо обеспечить подвод $50 \text{ м}^3/\text{мин}$ сжатого воздуха. При этом будет обеспечена производительность пневмотранспортной системы $30 \text{ м}^3/\text{ч}$, а скорость движения аэросмеси составит 27 м/с, Полученные расчетные значения полностью соответствуют экспериментальным данным, приведенным

в работах по пневмотранспортированию сыпучих материалов [2, 4, 5, 7].

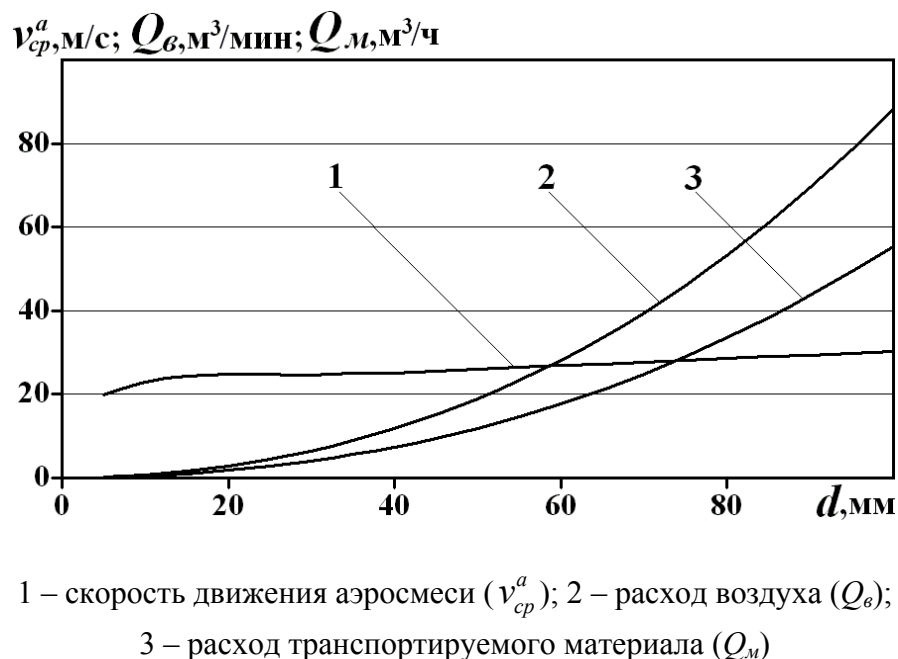


Рис. 3 – Зависимость средней скорости движения аэросмеси, расхода сжатого воздуха и транспортируемого материала от диаметра частиц транспортируемого материала

Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что для данного варианта пневмотранспортирования удельный расход сжатого воздуха составляет около 100 м^3 на 1 м^3 транспортируемой горной породы, а зависимости расходов воздуха и материала от размера частиц транспортируемого материала (коэффициент аппроксимации $R^2 = 0,9997$) носят параболический характер:

$$Q_в = a_в d^2 + b_в d + c_в; \quad (12)$$

$$Q_м = a_м d^2 + b_м d + c_м. \quad (13)$$

В то же время, зависимость средней скорости движения аэросмеси от размера частиц транспортируемого материала (коэффициент аппроксимации $R^2 = 1$) имеет в зависимости от диапазона изменения диаметра или кубический или линейный характер (см. рис. 3):

$$v_{cp}^a = a_{ск}^м d^3 + b_{ск}^м d^2 + c_{ск}^м d + f_{ск}^м \text{ — для } 0 < d < 40 \text{ мм}; \quad (14)$$

$$v_{cp}^a = a_{ск}^к d + b_{ск}^к \text{ — для } 40 \leq d < 100 \text{ мм}. \quad (15)$$

В общем случае коэффициенты в равенствах (12) – (15) зависят от характеристик самой пневмотранспортной системы, режима ее работы и физико-механических свойств транспортируемого материала. Однако, для предварительной инженерной оценки расходных характеристик процесса пневмотранспортирования и скорости движения аэросмеси, вполне приемлемо использование

значений коэффициентов уравнений аппроксимации, которые приведены в таблицах 1 и 2 (расчеты выполнены для $\rho_e = 1,3 \text{ кг/м}^3$; $V = 5 \cdot 10^{-5}$; $L_{mp} = 100 \text{ м}$; $K_d = 2,5$ и $\mu_m = 15$).

Таблица 1 – Значения коэффициентов уравнений аппроксимации зависимостей расходов воздуха и материала от размера частиц пневмотранспортируемого материала

Транспортируемый материал		Расчетный параметр	Значение коэффициентов					
$\rho_m, \text{ т/м}^3$	$k_{раз}$		a_e	b_e	c_e	a_m	b_m	c_m
2,0	1,3	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,011	-0,1635	1,6689	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0058	-0,0957	0,9763
	1,6	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,0081	-0,1329	1,356	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0047	-0,0777	0,7933
2,2	1,3	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,0105	-0,1715	1,7504	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0056	-0,0912	0,9309
	1,6	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,0085	-0,1394	1,4222	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0045	-0,0741	0,7564
2,4	1,3	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,0109	-0,1791	1,8282	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0053	-0,0873	0,8913
	1,6	$Q_e, \text{ м}^3/\text{мин}$	0,0089	-0,1455	1,4854	–	–	–
		$Q_m, \text{ м}^3/\text{ч}$	–	–	–	0,0043	-0,071	0,7242

Таблица 2 – Значения коэффициентов уравнений аппроксимации зависимости скорости движения аэросмеси от размера частиц пневмотранспортируемого материала

Транспортируемый материал		Диапазон $d, \text{ мм}$	Значение коэффициентов					
$\rho_m, \text{ т/м}^3$	$k_{раз}$		$a_{ск}^m$	$b_{ск}^m$	$c_{ск}^m$	$f_{ск}^m$	$a_{ск}^k$	$b_{ск}^k$
2,0	1,3	$0 < d < 40$	0,0007	-0,0499	1,2221	14,472	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0824	21,259
	1,6	$0 < d < 40$	0,0005	-0,0405	0,9929	11,758	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0669	17,273
2,2	1,3	$0 < d < 40$	0,0007	-0,0523	1,2806	15,146	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0863	22,258
	1,6	$0 < d < 40$	0,0006	-0,0425	1,0405	12,306	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0701	18,085
2,4	1,3	$0 < d < 40$	0,0007	-0,0545	1,3366	15,791	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0901	23,214
	1,6	$0 < d < 40$	0,0006	-0,0443	1,086	12,83	–	–
		$40 \leq d < 100$	–	–	–	–	0,0732	18,861

Выполнив осреднение соответствующих значений коэффициентов для уравнений аппроксимации (см. таблицы 1 и 2), равенства (12) – (15) для указанных выше условий транспортирования частиц горной породы (с диапазонами изменений: насыпной плотности от 2 т/м^3 до $2,4 \text{ т/м}^3$ и коэффициента разрыхления от 1,3 до 1,6) для предварительной оценки параметров пневмотранспортирования можно представить в виде

$$Q_e = 0,0097d^2 - 0,1553d + 1,582;$$

$$Q_m = 0,005d^2 - 0,0828d + 0,8454;$$

$$v_{cp}^a = 0,0006d^3 - 0,0473d^2 + 1,1598d + 13,7192 - \text{для } 0 < d < 40 \text{ мм};$$

$$v_{cp}^a = 0,0782d + 20,1583 - \text{для } 40 \leq d < 100 \text{ мм}.$$

Величина относительной погрешности применения осредненных значений коэффициентов аппроксимирующих уравнений в равенствах (12) – (15) составляет: для расхода сжатого воздуха 24 %; для расхода транспортируемого материала 28 % и для средней скорости движения аэросмеси 17 %. При этом величина погрешности с уменьшением насыпной плотности транспортируемого материала уменьшается с увеличением значения коэффициента разрыхления.

Таким образом, зная ориентировочный гранулометрический состав горной породы, полученный при проведении и ремонте горных выработок, можно получить как приближенные, так и более точные значения расходных характеристик и скоростей движения аэросмеси при применении пневматического способа оставления вмещающих пород в выработанном пространстве. Обеспечение достаточно высокой скорости движения аэросмеси позволяет повысить кинетическую энергию аэросмеси на выходе из транспортного трубопровода, что делает возможным существенно (до 0,8 – 0,85) увеличить относительную плотность закладочного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.Н. Транспортные машины и комплексы подземных разработок / В.Н. Григорьев, В.А. Дьяков, Ю.С. Пухов. – М.: Недра, 1976. – 399 с.
2. Ярмоленко Г.З. Пневматические турбины и струйные аппараты горных машин / Г.З. Ярмоленко. – М.: Недра, 1977. – 117 с.
3. Шашенко А.Н. Геомеханические процессы в породных массивах / А.Н. Шашенко, Т. Майхерчик, Е.А. Сдвижкова. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005. – 319 с.
4. Клячко Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталева. – Минск: Наука и техника, 1984. – 216 с.
5. Потураев В.Н. Вибрационно-пневматическое транспортирование сыпучих материалов / В.Н. Потураев, А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 1989. – 248 с.
6. Разумов И.М. Псевдооживление и пневматический транспорт сыпучих материалов / И.М. Разумов. – М.: Химия, 1964. – 160 с.
7. Механика вибрационно-пневматических машин эжекторного типа / В.Н. Потураев, А.Ф. Булат, А.И. Волошин [и др.]. – Киев: Наукова думка, 2001. – 176 с.

ПІДГОТОВКА І ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ СТАЦІОНАРНОЇ ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ

Рассмотрена возможность применения удобного и надежного радиотехнического метода анализа линейных цепей для контроля оборудования стационарной подъемной установки мобильной системой контроля, найдены условия и ограничения возможности применения радиотехнического метода. Предложена методика контроля с использованием подхода Байеса, которая ставит в соответствие каждому решению контроля число, что облегчает нахождение оптимального решения для контроля оборудования стационарной подъемной установки мобильной системой контроля. В двух вариантах поставлена и решена задача оптимизации числа датчиков вибрации при контроле оборудования стационарной подъемной установки мобильной системой контроля.

PREPARATION AND CONDUCT EXPERIMENTS USING A MOBILE SYSTEM OF STEADY HOISTING PLANT

The possibility of using a convenient and reliable electronic methods of analysis of linear circuits to control the equipment stationary hoist mobile monitoring system, found the conditions and limit the use of electronic methods. The technique of control using a Bayesian approach, which assigns a number to each control solution, making it easier to find the optimal solutions for the control of hospital equipment hoist mobile monitoring system. In the two versions and solved the problem of optimizing the number of sensors for vibration control equipment stationary hoist mobile monitoring system.

В даний час свердловинні штангові насосні установки (СШНУ) і шахтні підйомні комплекси (ШПК) - стаціонарні підйомні установки (СПУ) становлять важливу частку в соціальному та економічному житті України. ШПК це єдина ланка з'єднання гірської виробки з поверхнею, а СШНУ охоплює понад 65% діючого фонду свердловин на Україні. Відмінною особливістю устаткування СШНУ і ШПК – СПУ є безперервні технологічні процеси, що вимагають безперервного вимірювання аналогових параметрів, а також складність і вибухонебезпеку устаткування (для виконання проектних робіт вимагається узгодження з Держтехнаглядохоронпраці України), а основним джерелом змушених коливань у СПУ є привід головного руху. Більша частина СПУ експлуатується понад нормативний термін і зношені, тому мають місце численні відмови і аварії, кількість яких постійно зростає. Загальні збитки від аварій тільки на вугільних шахтах України складають до 33 млн. грн. у рік, а втрати видобутку складають до 100 тис. т [1-2]. Такі показники є типові для гірничодобувної і нафтовидобувної галузей України. Причина цих аварій у недосконалість існуючих приладів і методів контролю. Аналіз існуючих приладів і методів контролю свідчить про великий обсяг і в той же час неповноту існуючих методів контролю, що не пояснює істотну різницю в результатах контролю та не забезпечує безаварійну експлуатацію СПУ.

Тому актуальною є проблема визначення стану СПУ за непрямими ознаками. При цьому серед великого числа непрямих ознак треба вибрати такі, які дозволили б знаходити стан СПУ з достатньою мірою точності. Практичним