

В.П. Кондрахин, д-р техн. наук, Е.М. Арефьев,
(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО ОЧИСТИТЕЛЯ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Качественная очистка конвейерных лент от налипшего груза позволяет избежать заштыбовки подконвейерного пространства, и, следовательно, исключить небезопасный ручной труд, связанный с уборкой просыпи. Вибрационные очистители конвейерной ленты являются перспективными в связи с тем, что позволяют: обеспечить выведение рабочего органа очистителя из загрязненной зоны, исключить взаимный износ рабочей обкладки конвейерной ленты и рабочего органа очистителя, обеспечить неизменную во времени степень очистки. Несмотря на существенные преимущества, вибрационные очистители исследованы еще недостаточно полно, что говорит об актуальности вопроса выбора оптимальных параметров этих очистителей.

Анализ исследований и публикаций. В работе [1] В.Д. Зиневич и Ю.А. Пертен проводят исследования поперечных колебаний конвейерных лент в процессе виброочистки. В результате исследований авторы установили, что при значительном превышении частоты колебаний возмущающей силы над частотой собственных колебаний ленты можно получить ударное воздействие очистителя на ленту, при котором очистка будет наиболее эффективной.

Согласно работе [2], необходимое качество очистки может быть достигнуто при выполнении одного из двух условий: либо создании резонансного режима работы очистителя, либо обеспечении условия непрерывности очистки ленты при дорезонансном режиме работы очистителя, что противоречит рекомендациям [1].

Полученные в работах [1, 2] математические модели не позволяют корректно определить оптимальные параметры виброочистителя, поскольку имеют существенные упрощения:

- не учитываются силы, возникающие при контакте рабочего органа очистителя с лентой;
- предполагается, что возмущающая сила действует по гармоническому закону без учета особенностей конструкции очистителя и работы вибровозбудителя;
- не учитываются свойства налипшего материала.

Постановка задачи. Целью данной статьи является разработка основных принципов выбора и оптимизации параметров вибрационного очистителя конвейерной ленты с использованием математической модели процесса вибрационной очистки, адекватно отражающей основные свойства исследуемой системы [3].

Изложение материала и результаты

Затраты на виброочистку складываются из капитальных (изготовление или приобретение очистителя) и эксплуатационных. Капитальные затраты определяются стоимостью очистителя, которая значительно ниже стоимости конвейера и эксплуатационных годовых затрат, связанных с работой очистителя.

Эксплуатационные затраты при виброочистке зависят от стоимости потребленной очистителем электроэнергии, затрат на обслуживание очистителя, амортизационных отчислений и затрат на уборку просыпи в подконвейерном пространстве. Анализ, проведенный для типичных условий эксплуатации конвейеров в шахтах, показывает, что первые три составляющие эксплуатационных затрат более чем на два порядка меньше затрат на очистку подконвейерного пространства и могут не учитываться. В свою очередь, затраты на очистку подконвейерного пространства определяются средней толщиной неотделенного в результате очистки ленты слоя налипшего груза, зависящего от максимальных значений поперечных ускорений ленты a_{\max} [3].

Поскольку в настоящее время наибольшее распространение получили скребковые (ножевые) очистители, то в качестве функций цели при постановке задачи оптимизации параметров виброочистителя целесообразно принимать сравнительную годовую экономическую эффективность \mathcal{E} , учитывающую затраты при скребковой (базовый вариант) и вибрационной (предлагаемый вариант) очистке конвейерных лент:

$$\mathcal{E} = 3600 n_{\text{сут}} n_{\text{см}} T_{\text{см}} k_p C_{\text{пр}} VB(h_{\text{н.о}} - h_n), \quad (1)$$

где $n_{\text{сут}}$ – количество дней работы конвейера в году; $n_{\text{см}}$ – количество смен работы конвейера за сутки; $T_{\text{см}}$ – длительность смены, ч; k_p – коэффициент, учитывающий время работы конвейера; $C_{\text{пр}}$ – стои-

мость уборки 1 м^3 просыпи из подконвейерного пространства; V – скорость движения ленты; B – ширина ленты; $h_{н.о}$ – толщина неотделенного в результате ножевой очистки слоя горной массы [4]; h_n – толщина неотделенного в результате виброочистки слоя [4],

$$h_n = \frac{S}{g(a_{\max} + g)}, \quad (2)$$

S – прочность прилипания на отрыв налипшего слоя горной массы от ленты; g – плотность слоя налипшей горной массы.

В качестве оптимизируемых параметров, определяющих качество виброочистки, приняты: частота возмущения f , отношение собственных частот очистителя и ленты $\frac{f_{\text{с0}}}{f_{\text{л0}}}$, расстояние между осями поворота рамы очистителя и рабочего органа l_3 , амплитуда момента силы магнита, определяемого как

$$M_m = F_m l_2. \quad (3)$$

где F_m – амплитудное значение силы магнита; l_2 – плечо силы магнита относительно оси поворота рамы очистителя.

При решении задачи оптимизации вибрационных очистителей конвейерных лент учитываются следующие виды ограничений: параметрические, функциональные, критериальные.

Параметрические ограничения в соответствии с выявленными закономерностями:

– значения частоты возмущения f принимаются исходя из того, что в окрестностях точек, соответствующих совпадению частот возмущения и собственной ленты ($f/f_{0л}=1$), а также при $f/f_{0л}=2$ наблюдаются локальные максимумы ускорений ленты ($(f_0/f_{0л})_{\min}=0,8$, $(f_0/f_{0л})_{\max}=2,2$);

– согласно предварительным исследованиям, максимум виброускорений наблюдается при значениях отношений собственных частот очистителя $f_{0с}$ и ленты $f_{0л} - f_{0с}/f_{0л} > 1$ [5], причем нижний уровень этого параметра принят $(f_{0с}/f_{0л})_{\min}=1$, верхний уровень – $(f_{0с}/f_{0л})_{\max}=2$;

– минимальная длина рамы очистителя $l_{3\min}$ соответствует радиусу рабочего органа r_p , максимальная $l_{3\max}$ – половине пролета ленты в месте очистки $l'_p : l_{3\min} = r_p$, $l_{3\max} = l'_p / 2$;

– минимальный $M_{m\min}$ и максимальный $M_{m\max}$ моменты силы, создаваемой электромагнитным вибровозбудителем, определяются исходя из возможностей конструктивной реализации вибровозбудителя в условиях ограниченных габаритов.

Функциональные ограничения при решении задачи оптимизации:

– минимальная масса рамы очистителя должна ограничиваться по условию ее усталостной прочности;

– при работе очистителя должны исключаться соударения в магнитной системе, ход магнита не должен превышать максимально допустимого значения (рис. 1);

– рабочий орган очистителя в процессе работы не должен касаться ленты грузовой ветви (рис. 2).

В соответствии с ограничением, накладываемым на целевую функцию, сравнительная годовая экономическая эффективность виброочистки должна быть не меньше принимаемого минимального значения сравнительной годовой экономической эффективности, т.е. $\exists \geq \exists_{\min}$.

В общем случае математическую модель оптимизации параметров виброочистителя конвейерной ленты с учетом ограничений можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \bar{X}_{opt} \left\{ f, l_3, \frac{f_{e0}}{f_{л0}}, F_{я} \right\}; \\
 \bar{C} \left\{ S, q_{л}, V, l'_p, b, \Delta h', c_{к}, b_{к}, b_1, b_2, q_{н.с}, s, g, S_i, m_i \right\}; \\
 \left\{ n_{сум}, n_{см}, T_{см}, k_p, U_{np}, B, \Delta m_{дон}, \Delta m_0 \right\}; \\
 \vartheta = F(\bar{X}, \bar{C}) \rightarrow \max; \\
 \vartheta \geq \vartheta_{min}; \\
 l_2 < \min \left[\frac{\Delta m_{дон}}{2 \sin \left(\frac{y_{max} - y_{min}}{2} \right)}, \frac{\Delta m_0}{\sin(y_{min})} \right]; \\
 y_{max} \leq \arcsin \left(\frac{h_{е.к} - h_{дон} - \Delta h_0 - d_p}{l_3} \right)
 \end{array} \right. \quad (4)$$

где \bar{X} – вектор параметров очистителя; \bar{X}_{opt} – вектор параметров очистителя, соответствующий оптимальному значению целевой функции $\vartheta = F(\bar{X}, \bar{C})$; \bar{C} – вектор констант, не зависящих от параметров очистителя; y_{max}, y_{min} – соответственно максимальный и минимальный углы поворота рамы очистителя; $h_{е.к}$ – расстояние между грузной и порожней ветвями конвейера в месте очистки; $h_{дон}$ – допустимый зазор между рабочим органом очистителя и грузной ветвью; Δh_0 – расстояние от нижней точки рабочего органа очистителя до ленты перед началом работы очистителя.

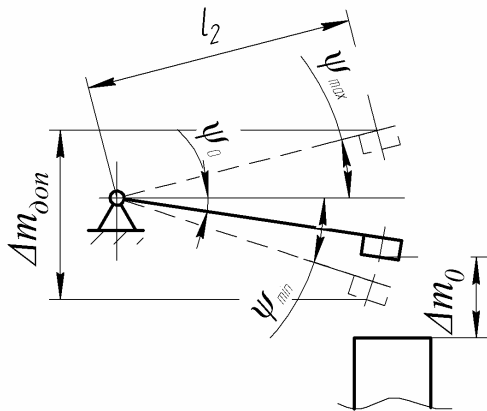


Рис. 1. К определению ограничений колебаний очистителя по допустимым параметрам магнитной системы

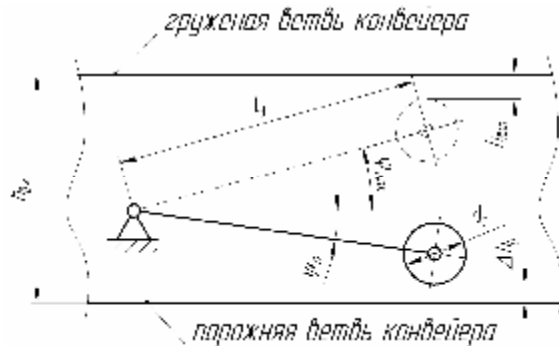


Рис. 2. К определению максимального угла отклонения рамы очистителя, обусловленного отсутствием контакта рабочего органа с грузной ветвью конвейера

Вектор констант \bar{C} определяется совокупностью параметров, которые условно можно разделить на следующие группы: 1) параметры конвейера S – натяжение ленты в зоне очистки, $\Delta h'$ – координата верхней точки ролика холостой ветви, $c_{к}$ – коэффициент контактной жесткости ленты, $b_{к}$ – коэффициент сопротивления движению при контакте рабочего органа очистителя с лентой, b_1 – коэффициент сопротивления движению очистителя, $q_{л}$ – погонная масса ленты; 2) параметры очистителя b_2 – коэффициент сопротивления движению ленты при поперечных колебаниях, $\Delta m_{дон}$ – допустимый ход электромагнита, Δm_0 – начальный зазор между ярмом и якорем; 3) параметры налипшего слоя S_i, m_i – площадь проекции и масса частицы размером d_i , $q_{н.с}$ – погонная масса слоя налипшей горной массы на ленте.

Для решения задачи оптимизации параметров вибрационного очистителя конвейерной ленты используем метод, основанный на равномерном заполнении точками пространства параметров. Оконча-

тельный выбор варианта производит лицо, принимающее решение, на основе анализа таблицы испытаний при отсутствии полной формализации задачи.

В процессе решения заполнение точками пространства параметров происходит с учетом выявленных закономерностей или равномерно, согласно детерминированному алгоритму

$$P_{i,j} = P_{i,\min} + \frac{(P_{i,\max} - P_{i,\min})(j-1)}{Z_i - 1}, \quad (5)$$

где Z_i – количество уровней i -го параметра; $P_{i,\min}$, $P_{i,\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения i -го параметра; $j=1, 2 \dots Z_i$ – порядковый номер значения i -го параметра.

На первом этапе оптимизации для каждой точки проводится вычислительный эксперимент, в результате которого определяется значение критерия (функции цели). Затем выбирается наилучшее решение, соответствующее критерию поиска.

На втором этапе оптимизации корректируются границы изменения оптимизируемых параметров с учетом выявленных на первом этапе закономерностей и определяются уточненные значения этих параметров.

В качестве примера приведем результаты оптимизации параметров вибрационного очистителя конвейера 2Л100У для следующих условий эксплуатации: натяжение ленты в месте очистки 80 кН; транспортируемый материал – уголь марки «А» с максимальной прочностью прилипания на отрыв от конвейерной ленты 602 Па [4]; плотность налипшего слоя 1050 кг/м³. Параметры конвейера: скорость движения ленты 2,5 м/с; длина пролета ленты в месте очистки 2015 мм; мощность привода 220 кВт; максимальная производительность 850 т/ч; конвейерная лента ШР-1000-4-ТК-200-5-2 РБ ГОСТ 20-85 с погонной массой 16,2 кг/м.

Количество уровней каждого фактора (параметра) принималось $Z_1=Z_2=Z_3=4$, $Z_4=3$. Таким образом, общее количество вариантов $\prod_{i=1}^4 Z_i = 192$.

Для заданных условий границы момента магнитной силы M_m следующие: $M_{m,\min}=500$ Н·м, $M_{m,\max}=1250$ Н·м.

Для каждого сочетания оптимизируемых параметров проводился вычислительный эксперимент. В табл. 1 приведено 10 лучших вариантов оптимизации в порядке возрастания значений целевой функции (критерия качества). В трех лучших вариантах 1-го этапа первый оптимизируемый параметр (частота возмущения), принимает значения, отличные от собственной частоты ленты, второй параметр (отношение собственных частот очистителя и ленты) для первых семи значений – соответствует равенству собственных частот очистителя и ленты. Третий параметр (длина рамы очистителя) в первых 10-ти вариантах принимает все рассмотренные значения, кроме минимального. Четвертый параметр (момент силы магнита) в первых 4-х вариантах соответствует двум максимальным значениям.

Таблица 1

Результаты 1-го этапа оптимизации параметров вибрационного очистителя конвейера 2Л100У

№ п/п	Оптимизируемые параметры				Значения целевой функции
	f , Гц	f_{0d}/f_{0l}	M_m , Н·м	l_3 , м	\mathcal{E} , тыс, грн
1	21,8	1	1000	1	130,8
2	54,7	1	1250	0,535	106,9
3	21,8	1	1250	1	105,4
4	27,3	1	500	0,535	78,8
5	24,6	1	1000	0,765	78,5
6	27,3	1	1250	0,535	70,8
7	54,7	1	1000	0,535	70,6
8	21,8	1,5	1250	1	69,5
9	21,8	1,5	500	0,765	69,0
10	27,3	1,5	1000	1	64,5

На основании результатов первого этапа оптимизации уточняется область пространства параметров, в которой находится максимальное значение целевой функции. На втором этапе были скорректированы границы диапазона значений: для второго параметра (отношение собственных частот очистителя и ленты): $(f_{0d}/f_{0l})_{\min} = 0,8$, $(f_{0d}/f_{0l})_{\max} = 1,2$; для третьего параметра (длина рамы очистителя) $l_{3,\min} = 0,535$ м; $l_{3,\max} = 1,0$ м. Количество уровней параметров принималось: $N_1=6$; $N_2=4$; $N_3=7$; $N_4=4$. Таким образом, об-

щее количество вариантов $\prod_{i=1}^4 Z_i = 672$. Результаты поиска оптимального решения на втором этапе сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты 2-го этапа оптимизации параметров вибрационного очистителя конвейера 2Л100У

№ п/п	Оптимизируемые параметры				Значения целевой функции
	$f, \text{Гц}$	$f_{0\theta}/f_{0\pi}$	$M_m, \text{Н}\cdot\text{м}$	$l_3, \text{м}$	$\mathcal{E}, \text{тыс. грн}$
1	23,2	1,0	1000	0,765	131,6
2	21,8	1,0	1000	1	130,8
3	21,8	1,1	1250	0,995	111,4
4	54,7	1,0	1250	0,535	106,9
5	21,8	1,0	1250	1	105,4
6	21,8	1,2	1000	1	104,3
7	23,2	1,0	1250	0,765	104,2
8	25,9	1,2	1250	0,88	102,4
9	23,2	1,2	1000	0,88	90,9
10	21,8	1,2	750	0,65	88,9

Разница между значениями целевой функции 1-го и 2-го этапов оптимизации составляет 800 грн (менее 2 %).

Следует подчеркнуть, что вариант, рекомендованный в литературе [1], при котором частота возмущения соответствует собственной частоте ленте занимает лишь 15-е место в таблице испытаний и проигрывает лучшему варианту более чем в два раза. Таким образом, для рассматриваемых условий можно рекомендовать следующие значения оптимизируемых параметров: $f=21,8 - 23,2 \text{ Гц}$; $f_{0\theta}/f_{0\pi}=1,0 - 1,1$; $M_m=1000 - 1250 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $l_3=0,765 - 1,0 \text{ м}$.

Выводы. Установлено, что в качестве целевой функции при оптимизации параметров виброочистителей целесообразно использовать сравнительную годовую экономическую эффективность, а в качестве базового варианта принять наиболее распространенные скребковые очистные устройства. Оптимизируемыми параметрами, определяющими качество виброочистки, целесообразно принять: частоту возмущения, отношение собственных частот очистителя и ленты, расстояние между осями поворота рамы очистителя и рабочего органа, амплитуду момента силы магнита.

Реализация разработанной методики применительно к конвейеру 2Л100У показала, что при выборе оптимальных параметров годовой экономический эффект обеспечивается за счет снижения затрат на очистку подконвейерного пространства и составляет порядка 130 тыс. грн.

Список литературы

1. Зиневич В.Д., Пертен Ю.А. Вибрационная очистка конвейерных лент/ Горные машины и автоматика. М.: ЦИТИ-угля, 1961.
2. Тарасов Ю.Д. Очистка конвейерных лент и подконвейерного пространства.- М.: Недра, 1993. - 192 с.
3. Кондрахин В.П. Математическая модель процесса вибрационной очистки конвейерной ленты / Кондрахин В.П., Арефьев Е.М., Хиценко Н.В. // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк, 2011. - Вип. 23(196). - С. 83-91.
4. Будишевский В.А. Сравнительный анализ качества очистки конвейерных лент ножевыми и вибрационными очистителями/ Будишевский В.А., Арефьев Е.М., Хиценко Н.В., Мерзликин А.В. // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2008. - №2. - С.202-209.
5. Будишевский В.А., Арефьев Е.М., Яценко В.А., Хиценко Н.В. Экспериментальная оценка эффективности режимов работы виброочистителя конвейерной ленты/ Уголь Украины. - 2011. - №2. - С. 20-24.

Рекомендовано до друку: проф. Самусю В.І.