

УДК 622.647.2

Р.В. Кирия

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Применение компьютерных технологий в горнодобывающей промышленности позволяет повысить эффективность работы горных машин за счет выбора оптимальных режимов их работы. В частности, в конвейерном транспорте выбор оптимальных режимов пуска мощных ленточных конвейеров позволит существенно снизить динамические нагрузки на элементы привода конвейера и тем самым повысить надежность конвейерного оборудования.

Вопросы оптимального управления пуском ленточного конвейера рассматривались в работах В.Л. Иносова [1], А.Н. Подъемщикова [2], В.К. Смирнова [3].

В работе [1] рассмотрена задача оптимального управления пуском одноприводного ленточного конвейера с жестким натяжным устройством. В ней математическая модель, описывающая упругие возмущения в ленте конвейера при пуске, представляет собой дискретную математическую модель, в которой лента заменяется системой точечных масс, связанных между собой упругими связями. Управляющая функция аппроксимируется кусочно-линейной функцией и представляется суммой ряда линейных функций с неизвестными коэффициентами. В результате задача оптимального управления пуском ленточного конвейера сводится к задаче линейного программирования с большим количеством ограничений в виде неравенств. Точность полученного решения задачи оптимального управления пуском ленточного конвейера в этой работе зависит от количества точечных масс, на которые разбивается лента, и ее длины. Поэтому этот алгоритм для каждого конкретного конвейера необходимо заново корректировать, что снижает эффективность его применения в управлении пуском конвейера.

В работе [2] также рассматривалась задача оптимизации пусковых режимов ленточных конвейеров. При этом рассматривались несколько однокритериальных задач, в которых критериями эффективности являлись время пуска при ограничении на

максимальное натяжение ленты и максимальное натяжение ленты при ограничении на время пуска конвейера. В отличие от предыдущей работы лента заменялась точечными массами, связанными упругими и диссипативными связями. Однако в этой работе алгоритм оптимального управления пуском не описан.

В работе [3] разработан алгоритм моделирования динамических процессов при пуске одноприводного ленточного конвейера для любых характеристик электродвигателя. При этом оптимизация сводилась к выбору рациональных характеристик пуска посредством сравнения различных вариантов.

Следовательно, в настоящее время не существует достаточно простого универсального алгоритма оптимального управления пуском ленточного конвейера.

Целью данной работы является создание такого алгоритма.

Рассмотрим процесс пуска одноприводного ленточного конвейера с жестким натяжным устройством, расположенным в хвосте конвейера (рис. 1).

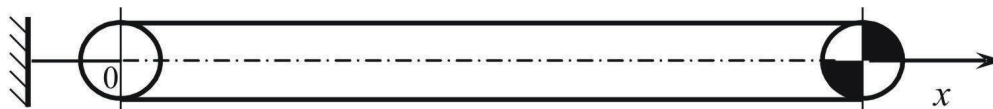


Рисунок 1 - Схема одноприводного конвейера

Согласно [4], система дифференциальных уравнений, описывающая динамические процессы пуска ленточного конвейера, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial \varepsilon} = \rho a \cdot \frac{\partial V_{\Gamma}}{\partial \eta}; \\ \frac{\partial W_{\Gamma}}{\partial \eta} = \frac{E}{a} \cdot \frac{\partial V_{\Gamma}}{\partial \varepsilon}; \\ \frac{\partial W_{\chi}}{\partial \varepsilon} = \rho a \cdot \frac{\partial V_{\chi}}{\partial \eta}; \\ \frac{\partial W_{\chi}}{\partial \eta} = \frac{E}{a} \cdot \frac{\partial V_{\chi}}{\partial \varepsilon}, \end{cases} \quad (1)$$

при начальных условиях: при $\eta = 0$

$$V_{\Gamma}(\varepsilon, 0) = V_{\chi}(\varepsilon, 0) = 0; \quad W_{\Gamma}(\varepsilon, 0) = W_{\chi}(\varepsilon, 0) = 0, \quad (2)$$

где $W_{\Gamma}(\varepsilon, \eta)$, $W_{\chi}(\varepsilon, \eta)$ – динамические составляющие натяжения в грузовой и холостой ветвях ленты конвейера соответственно, Н; $V_{\Gamma}(\varepsilon, \eta)$, $V_{\chi}(\varepsilon, \eta)$ – скорости точек грузовой и холостой ветвей ленты

конвейера соответственно, м/с; ε , η – соответственно безразмерные координаты и время; a – скорость распространения упругих возмущений в ленте, м/с; E – агрегатная жесткость ленты при ее растяжении, Н; ρ – эквивалентная погонная плотность ленты, кг/м ($\rho = E/a^2$).

Безразмерные координаты и безразмерное время определяются по формулам

$$\varepsilon = \frac{x}{L}; \quad \eta = \frac{at}{L},$$

где x – координата, направленная вдоль ленты в направлении головного барабана, с центром на оси хвостового барабана конвейера, м, (см. рис. 1); t – текущее время, с; L – длина контура ленты конвейера, м.

Динамические составляющие натяжения W_Γ , W_x определяются из выражений

$$W_\Gamma = S_\Gamma - \frac{1}{2}(q_\Gamma + q_\Delta)L \sin \beta - S_0; \quad W_x = S_x - \frac{1}{2}q_\Delta L \sin \beta - S_0,$$

где S_Γ , S_x – соответственно натяжение ленты на грузовой и холостой ветвях ленты при пуске, Н; S_0 – натяжение ленты от натяжной станции, Н; q_Γ – погонный вес груза, кг/м; q_Δ – погонный вес ленты, кг/м; β – угол наклона конвейера к горизонту, град.

Граничные условия на хвостовом и приводном барабанах зависят от типа натяжного устройства.

Для жесткого натяжного устройства (рис. 1) в силу условия неразрывности ленты имеем:

на хвостовом барабане при $\varepsilon = 0$

$$V_\Gamma(0, \eta) = -V_x(0, \eta), \quad W_\Gamma(0, \eta) = W_x(0, \eta); \quad (3)$$

на приводном барабане при $\varepsilon = 1/2$

$$V_\Gamma(1/2, \eta) = -V_x(1/2, \eta); \quad W_\Gamma(1/2, \eta) - W_x(1/2, \eta) = F(V_\Gamma) - G_1 - \frac{am}{L} \cdot \frac{dV_\Gamma}{d\eta}, \quad (4)$$

где $F(V_\Gamma)$ – пусковая характеристика привода в координатах F , V , Н (рис. 2); G_1 – сила сопротивления движению ленты и груза, включающая скатывающую силу от веса груза и ленты конвейера, Н; m – приведенная масса груза вращающихся частей привода ленточного конвейера, кг.

Сила сопротивления движению ленты и груза конвейера равна

$$G_1 = \frac{L}{2} [(q_\Gamma + q_\Delta + q'_\Gamma) \omega_\Gamma \cos \beta + (q_\Delta + q'_\Delta) \omega_\Delta \cos \beta + q_\Gamma \sin \beta],$$

где $\omega_\Gamma, \omega_\Delta$ – коэффициенты сопротивления движению ленты и груза по роликоопорам грузовой и холостой ветвей соответственно; q'_Γ, q'_Δ – приведенный вес вращающихся частей роликоопор грузовой и холостой ветвей соответственно, кГ/м.

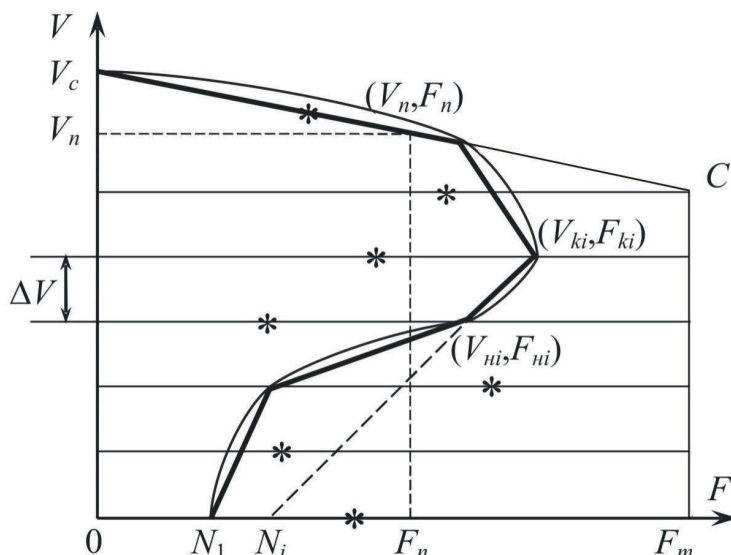


Рисунок 2 - Аппроксимированная пусковая характеристика двигателя конвейера

Функция $F(V_\Gamma)$ в этой задаче управления пуском является управляющей функцией, ее графике представлен на рис. 2.

В соответствии с физическими процессами, происходящими в асинхронном электроприводе, на пусковую характеристику накладываются определенные ограничения.

Для заданного электродвигателя линейная скорость точек конвейерной ленты на барабане не должна превышать синхронной скорости V_c ($V_\Gamma < V_c$), а усилие на приводном барабане не должно превышать максимальное усилие электродвигателя F_m ($F < F_m$). Последний участок характеристики должен находиться на естественной характеристике электродвигателя, то есть проходить через синхронную скорость на оси OV и точку, соответствующую номинальной скорости V_n и номинальному усилию привода F_n . Это означает, что любая пусковая характеристика электродвигателя конвейера проходит внутри прямоугольной трапеции OV_cCF_m (см. рис. 2). Другими словами, управляющая функция $F(V_\Gamma)$ должна находиться внутри прямоугольной трапеции OV_cCF_m .

Кроме того, для осуществления пуска ленточного конвейера необходимо, чтобы выполнялись следующие ограничения:

- на ускорение точек ленты при пуске конвейера:

$$\frac{dV}{dt} < a_{np}, \quad (5)$$

где $a_{np} = g(f \cos \beta - \sin \beta)$ – предельное значение ускорения ленты, при котором груз начинает скользить вдоль нее, м/с²; f – коэффициент трения груза о ленту; V – скорость ленты при пуске, м/с;

- на прочность конвейерной ленты:

$$kS_{max} < S_{np}, \quad (6)$$

где S_{max} – максимальное натяжение ленты, Н; S_{np} – предельная прочность ленты, Н; k – коэффициент запаса прочности конвейерной ленты;

- на непроскальзывание ленты на приводном барабане:

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} < e^{\mu\alpha}, \quad (7)$$

где $S_{нб}, S_{сб}$ – соответственно натяжение ленты на приводном барабане в точке набегания и сбегания, Н; α – угол обхвата ленты на приводном барабане, град.; μ – коэффициент сцепления ленты с барабаном;

- на непровисание ленты конвейера:

$$S_{min} < S_0, \quad (8)$$

где S_0 – натяжение, при котором реализуется предельное провисание ленты, Н; S_{min} – минимальное натяжение ленты, Н.

За критерий эффективности в этой задаче принимаются:

- время пуска конвейера T_n , определяемое из условия

$$|V_{г}(T_n) - V_{л}| < \varepsilon, \quad (9)$$

где $V_{л}$ – скорость ленты конвейера при стационарном движении, м/с; ε – малая положительная величина;

- коэффициент динамичности K_{∂} , определяемый по формуле

$$K_{\partial} = \frac{S_{max}}{S_{ст}}, \quad (10)$$

где $S_{ст}$ – натяжение ленты на приводном барабане при стационарном движении конвейера, Н.

Следовательно, задача оптимального управления пуском ленточного конвейера формулируется следующим образом.

Для заданного ленточного конвейера необходимо найти пусковую характеристику электродвигателя, т.е. управляющую функцию $F(V_r)$, при которой время пуска T_n и коэффициент динамичности K_∂ , определяемые по формулам (9), (10), были бы минимальны. При этом процесс пуска описывается системой уравнений (1) при начальных и граничных условиях (2), (3).

Кроме того, на управляющую функцию $F(V_r)$ накладываются ограничения, при которых она должна находиться внутри прямоугольной трапеции OV_cCF_m (см. рис.2), а на процесс пуска накладываются ограничения (5)-(8).

Поставленная задача оптимального управления пуском ленточного конвейера является двухкритериальной задачей оптимального управления системой с распределенными параметрами [5].

Для решения поставленной задачи пусковую характеристику электродвигателя аппроксимируем кусочно-линейным сплайном, который можно представить в виде (см. рис. 2):

$$F(V_r(\eta)) = \sum_{i=0}^n (N_i + q_i V_r(\eta)) \cdot [\sigma_0(\eta - \eta_i) - \sigma_0(\eta - \eta_{i+1})], \quad (11)$$

где N_i – координата пересечения i -го линейного участка аппроксимированной характеристики с осью OF , Н; q_i – тангенс угла наклона i -го линейного участка аппроксимированной характеристики к оси OF , кг/с; η_i – моменты перехода с одного линейного участка пусковой характеристики на другой; $\sigma_0(\eta)$ – единичная функция Хевисайда; n – количество линейных участков характеристики.

Параметры N_i , q_i определяются по координатам (V_{ni}, F_{ni}) начальной и координатам (V_{ki}, F_{ki}) конечной точек i -го линейного участка аппроксимированной характеристики электродвигателя согласно формул

$$q_i = \frac{F_{ki} - F_{ni}}{V_{ki} - V_{ni}}; \quad N_i = F_{ni} - q_i V_{ni}.$$

Затем, с помощью метода припасовывания [4,6] получена математическая модель динамического процесса пуска ленточного конвейера, сводящаяся к рекуррентным соотношениям и позволяющая по заданной аппроксимированной характеристике

электродвигателя определить скорость и динамические усилия в ленте на приводном барабане по ее значениям на предыдущих шагах времени. То есть на приводном барабане имеем:

при $\varepsilon = 1/2$

$$V_r(\eta_{j+1}) = \frac{L}{ma_c}(N_i - G_1)g_i(\Delta\eta) + V_r(\eta_j)\lambda_i(\Delta\eta) + \frac{2EL}{ma^2}g_i(\Delta\eta)(\Pi_1 + \Pi_2);$$

$$W_r(\eta_{j+1}) = \frac{E}{a} \sum_{k=0}^{r_2} (-1)^k [V_r(\eta_{j+1} - k) - V_r(\eta_{j+1} - k - 1)], \quad (12)$$

где $\Pi = 2 \sum_{k=0}^r (-1)^k V_r(\eta_j - k)$; $r = [\eta_j]$ – целая часть η_j ; $g_i(\Delta\eta) = \frac{1 - e^{-\alpha_i \Delta\eta}}{\alpha_i}$;

$$\lambda_i(\Delta\eta) = e^{-\alpha_i \Delta\eta}; \quad \alpha_i = \frac{2EL}{ma^2} - \frac{q_i L}{ma}; \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n \cdot s.$$

Для определения оптимальной характеристики электродвигателя применялся метод зондирования области варьируемых параметров с помощью датчика случайных чисел. При этом варьируемыми параметрами являлись координаты начальных (V_{ni}, F_{ni}) и конечных (V_{ki}, F_{ki}) точек линейных участков характеристик двигателя.

При этом, область варьируемых параметров, т.е. прямоугольная трапеция OV_cCF_m в плоскости VF (см. рис. 2) разбивалась на m частей горизонтальными линиями, одинаково отстоящими друг от друга на расстоянии ΔV параллельно оси OF . С помощью датчика случайных чисел выбирались точки на горизонтальных отрезках, то есть начальный и конечный моменты на каждом i -том линейном участке аппроксимированной характеристики. Кроме того, с помощью датчика случайных чисел выбирается точка на последней естественной характеристике электропривода. На рис. 2 эти точки показаны «звездочками». Полученные точки соединялись отрезками прямой линии. В результате получались аппроксимированные характеристики двигателя, для которых по формулам (12) определялись скорость $V_r(t)$ и динамическое усилие $W_r(t)$ в ленте на приводном барабане в любой момент время пуска, а затем по формулам (9), (10) вычислялись критерии: время пуска T_n и коэффициент динамичности K_∂ .

Решение поставленной задачи сводится к определению множества Парето [5] из множества точек $(T_n; K_\partial)$, полученных при имитации различных вариантов пуска конвейера. Это множество

обладает тем свойством, что пуск по любой другой характеристике двигателя осуществляется дольше и с большей динамикой.

На рис. 3,а,б показаны оптимальные пусковые характеристики асинхронного электродвигателя ленточного конвейера, построенные с помощью разработанного алгоритма. Пусковые характеристики построены в системе координат $(S; \bar{M})$, где S – скольжение двигателя, $S = (V_c - V)/V_c$; \bar{M} – момент двигателя, отнесенный к номинальному моменту и приведенный к радиусу приводного барабана конвейера, $\bar{M} = F/F_m$. При этом длина ленточного конвейера равнялась 840 м, скорость ленты при стационарном движении равнялась 3 м/с, а мощность асинхронного электродвигателя равнялась 800 кВт.

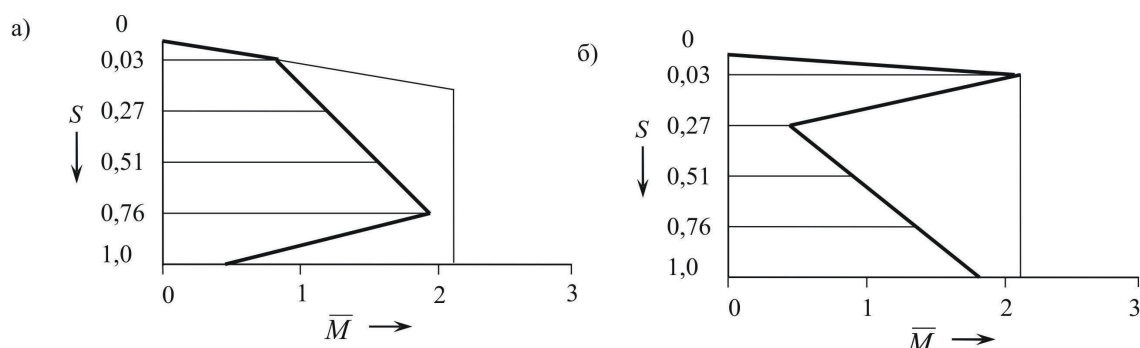


Рисунок 3 - Оптимальные пусковые характеристики двигателя конвейера

Оптимальные пусковые характеристики группируются вокруг двух характерных форм (см. рис. 3,а,б). Первая группа оптимальных характеристик (см. рис. 3,а) имеет начальный разгонный участок, на котором момент двигателя увеличивается с небольшого значения до максимальной величины, а затем постепенно снижается до минимального значения. Другими словами, в начале происходит предварительный разгон конвейера с малого значения момента электродвигателя. Во второй группе характеристик (см. рис. 3,б), в отличие от первой группы, предварительного разгона нет, разгонный участок появляется только в конце процесса пуска.

В начале пуска происходит резкое увеличение момента, а затем его снижение до небольшой величины. После этого происходит увеличение момента до максимального, а затем снижение его до номинального значения. Кроме того, для первой группы оптимальных характеристик коэффициент динамичности больше, а время пуска меньше по сравнению со второй группой оптимальных характеристик. Однако реализовать оптимальную характеристику

второй группы сложнее, чем первой. Поэтому для длинных конвейеров при пуске выбирается оптимальная характеристика из первой группы (см. рис. 3,а).

Исследования показали, что для конвейеров, длиной меньше 500м, существует лишь первая группа оптимальных пусковых характеристик (см. рис. 3,а). Это связано с различной волновой картиной, возникающей при пуске средних и длинных ленточных конвейеров.

Следовательно, поставлена и решена двухкритериальная задача оптимального управления пуском ленточного конвейера. На основании метода зондирования области варьируемых параметров с помощью датчика случайных чисел разработан алгоритм поиска оптимальных характеристик пуска ленточного конвейера. С помощью полученного алгоритма для мощных ленточных конвейеров были найдены две различные группы оптимальных пусковых характеристик электропривода. В первой группе оптимальных характеристик разгон конвейера происходит в начале процесса пуска, а во второй группе разгон конвейера происходит в конце процесса пуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иносов В.Л. Оптимальное управление пуском ленточного конвейера [Текст] / В.Л. Иносов, Ф.Н. Теплицкий // Изв. Горный журнал. - 1970. - №1. - С. 155-160.
2. Спиваковский А.О. Теория ленточных конвейеров [Текст] / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. - М.: Наука, 1982. - 192 с.
3. Смирнов В.К. Исследование пуска наклонного конвейера с учетом механических характеристик двигателей [Текст] / В.К. Смирнов, И.А. Бужинский, В.П. Неня // Вопросы рудничного транспорта. - Киев: Наукова думка, 1974. - С. 69-85.
4. Кирия Р.В. Моделирование динамических процессов пуска ленточных конвейеров [Текст] // Вісник Дніпропетровського Університету: Механіка: Зб. наук. пр. / ДНУ. – Дніпропетровськ, 2007. - №11. – Т.2. – С.
5. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами [Текст]. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
6. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями [Текст] / И.И. Соболев, Е.А. Статников. - М.: Наука, 1981. – 110 с.

Получено 21.03.2008 г.