

ния;

$K_7 = 0,5$ – крепь может работать в двух диапазонах пластов по углу падения (например, от 0 до 55°);

$K_7 = 1$ – крепь может работать в трех диапазонах пластов по углу падения (например, от 0 до 90°).

Оценка технического совершенства механизированной крепи производится при помощи метода Дельфи с использованием единичных, базовых и обобщенных показателей качества крепи.

Обобщенный показатель технического уровня механизированной крепи определяется суммированием показателей $K_1 \dots K_7$:

$$q = \sum_{i=1}^{i=7} K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 \quad (5)$$

Использование обобщенного показателя технического совершенства механизированной крепи при анализе различных по конструкции крепей позволит обоснованно выбрать наилучший вариант крепи из большого числа анализируемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кажевников С.Н. Теория механизмов и машин. М.: Машиностроение – 1973,-265 с.

УДК 622.64:622.341.1

Канд. техн. наук Т.И. Жигула
канд. техн. наук Л.П. Ладутина
канд. техн. наук В.Ю. Максютенко
(ИГТМ НАН Украины)

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИВОДОМ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЕГО РАБОТЫ

Сформульовано задачі оптимального управління приводом стрічкового конвейера щодо режимів пуску, стаціонарного руху та гальмування. Вибрано критерії якості управління з умов економії ресурсів, що споживаються, та постійного навантаження конвейерної стрічки. Отримано відповідні їм функціонали якості, що мінімізуються.

OPTIMAL CONTROL OF BELT CONVEYER DRIVE UNDER VARIOUS WORKING CONDITIONS

The tasks of optimal control of belt conveyor drive under the starting, stationary and brake conditions are formulated. Control criteria on the conditions of consumed resources and constant loading of conveyor belt are chosen. Appropriate minimizing functional are composed.

Общей тенденцией в развитии горно-транспортной техники в нашей стране и за рубежом является рост удельного веса конвейерного транспорта и создание транспортных систем с автоматизированным управлением. Поэтому в настоящее время особо стоит проблема модернизации и повышения эффективности работы непрерывного транспорта.

Эта проблема не может быть решена без разработки систем управления, необходимых для реализации требуемых режимов работы конвейеров и их оптимизации в целях обеспечения долговечности электромеханического комплекса и достижения наилучших технико-экономических показателей. Решение задач компьютерного управления конвейерным транспортом дает возможность не только снизить потребление природных и экономических ресурсов при его эксплуатации, но и наиболее эффективно организовать технологические процессы транспортирования с применением автоматизированного управления.

Такие исследования в течение ряда лет успешно выполняются в отделе физико-механических основ горного транспорта ИГТМ НАНУ.

Одной из задач управления конвейерным транспортом является задача управления приводом ленточного конвейера, которое при различных режимах работы конвейера позволит снизить динамические нагрузки на ленту, регулировать скорость ленты в соответствии с производительностью добычных механизмов, а также экономить потребляемую электроэнергию.

Наибольшее распространение для приводов ленточных конвейеров получили асинхронные двигатели, которые при простой конструкции обладают высокими показателями надежности и экономичности.

При проектировании и эксплуатации электроприводов конвейеров основным требованием является снижение динамических нагрузок на элементы конвейера, высокие значения которых, снижая его срок службы, ведут к увеличению себестоимости транспортирования. К такому результату приводят также потери электроэнергии при работе электродвигателя. Кроме того, бывает необходимо обеспечить минимальное время переходных процессов для увеличения производительности конвейерной установки.

Выполнить указанные требования возможно путем оптимального управления приводом конвейера при различных режимах работы: пуске, установившемся движении и торможении.

Целью настоящей работы является разработка теоретических предпосылок для создания обобщенной математической модели управления приводом ленточного конвейера от его пуска до остановки.

Рассмотрим сначала задачи управления переходными режимами – пуском и торможением конвейера.

Для приводов транспортных машин очень важным является выбор механической характеристики двигателя, от которой зависят величины динамических нагрузок, время переходных процессов, потери электроэнергии и другие показатели. Механическая характеристика электродвигателя в конечном итоге определяет уровень производительности и экономичности машины.

При пуске и торможении конвейера в ленте могут возникать значительные усилия, приводящие к снижению срока службы ленты или пробуксовке ее по барабану. Кроме того, для транспортных машин, работающих с частыми остановками, время переходных процессов может сказаться на их производительности.

Поэтому задача оптимального управления пусковым режимом привода конвейера состоит в том, чтобы достичь заданной скорости конвейерной ленты за минимальный отрезок времени с минимальным коэффициентом динамичности K_D

(равным отношению максимального натяжения $W_{нб\max}$ в точке набегания ленты на приводной барабан к натяжению W в ленте при установившейся скорости ее движения) и минимальными потерями электроэнергии. Эти критерии (критерии качества) определяют оптимальную пусковую характеристику электродвигателя конвейера.

При этом должны удовлетворяться следующие ограничения [2]:

- по ускорению ленты при пуске

$$\frac{dV}{dt} < a_{np}, \quad (1)$$

где $a_{np} = g(f \cos \beta - \sin \beta)$ – предельное ускорение ленты, при котором начинается скольжение груза, m/s^2 ; g – ускорение силы тяжести, m/s^2 ; f – коэффициент сопротивления движению; β – угол наклона конвейера, рад; V – скорость ленты, m/s^2 ;

- по условию прочности конвейерной ленты

$$kW_{нб\max} < S_{np}, \quad (2)$$

где k – коэффициент запаса прочности ленты; S_{np} – предельное натяжение ленты (величина разрывного усилия), Н;

- по условию сцепления ленты с приводным барабаном

$$\frac{W_{нб}}{W_{сб}} < e^{\mu\alpha}, \quad (3)$$

где $W_{нб}$, $W_{сб}$ – натяжение ленты на приводном барабане в точках набегания и сбегания соответственно, Н; μ – коэффициент сцепления ленты с барабаном, α – угол обхвата лентой приводного барабана, рад;

- по условию непровисания ленты, т.е. натяжение в верхней ветви ленты не должно быть ниже $W_{дон.\min}$ [2]

$$W_{нб} > W_{дон.\min} = 5 \div 8(q_z + q_l)l_p, \quad (4)$$

где q_z и q_l – погонный вес груза и ленты соответственно; Н/м; l_p – расстояние между роlikоопорами, м.

Задача оптимального управления тормозным режимом конвейера аналогично управлению его пуском состоит в том, чтобы снизить скорость транспортирования до нуля за минимальное время торможения с минимальным коэффициентом динамичности при торможении и минимальными потерями электроэнергии.

Динамические усилия в ленте при различных режимах работы конвейера определяются из дифференциальных уравнений динамики привода

$$J_{\Sigma} \dot{\omega}(t) = M(t) + R(W_{сб} - W_{нб}) \quad (5)$$

и уравнений динамики грузовой и порожней ветвей ленты

$$(\rho_l + \rho_z) \frac{d^2 u_z}{dt^2} + \alpha_z \frac{du_z}{dt} = EF \frac{d^2 u_z}{dx^2} + (\rho_l + \rho_z)(g \sin \beta \pm V_l) + \alpha_z V; \quad (6)$$

$$\rho_l \frac{d^2 u_n}{dt^2} + \alpha_n \frac{du_n}{dt} = EF \frac{d^2 u_n}{dx^2} + \rho_l (g \sin \beta + V) + \alpha_n V, \quad (7)$$

которые должны быть дополнены граничными условиями на барабанах

$$u_{c\bar{b}i}(x_{c\bar{b}i}, t) = u_{н\bar{b}i}(x_{н\bar{b}i}, t - \Delta t), \quad (8)$$

$$(i=1, 2, \dots, n).$$

Здесь приняты следующие обозначения: J_Σ – суммарный момент инерции барабана, двигателя и редуктора, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$; ω – угловая скорость барабана, $\text{рад}/\text{с}$; R – радиус барабана, м ; $M(t)$ – механическая характеристика двигателя; t – текущее время, с ; u – продольная деформация ленты, м ; $W = EF \frac{du}{dx}$ – натяжение ленты в сечении x в

момент времени t , Н ; ρ_l, ρ_z – линейные плотности ленты и транспортируемого груза, $\text{кг}/\text{м}$; E – модуль упругости ленты, $\text{Н}/\text{м}^2$; F – площадь поперечного сечения ленты, м^2 ; γ – коэффициент внутреннего трения в ленте, с^{-1} ; α_z, α_n – коэффициенты трения соответственно грузовой и порожней ветвей конвейера о ролики.

Решение системы дифференциальных уравнений (5), (6), (7) дает возможность исследовать процессы функционирования ленточных конвейеров и выбрать оптимальные механические характеристики их электроприводов.

Цель оптимального управления различными системами можно рассматривать как достижение экстремума критерия качества за счет выбора оптимального вектора управления $F[3]$. Т.е. для решения задачи оптимального управления переходными режимами ленточного конвейера в рассматриваемом случае необходимо минимизировать функционалы (критерии) качества:

$$J_i(F) \rightarrow \min \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

за счет выбора оптимальной механической характеристики $M(t)$ электропривода, входящей в уравнение его динамики (6), и в рассматриваемом случае являющейся оптимальным вектором управления приводом конвейера.

Составим функционалы качества управления переходными режимами конвейера.

Коэффициент динамичности

$$K_d = \frac{W_{н\bar{b} \max}}{W}$$

является функцией от нагрузки на ленту и ее ускорения и определяется из уравнений (6)-(8).

Условие минимума коэффициента динамичности

$$J_1 = \int_0^T K_d dt \rightarrow \min, \quad (10)$$

где T – время переходного процесса, с.

При частотном управлении асинхронным двигателем потери его электроэнергии при работе в пусковом режиме можно определить из выражения [4]

$$\Delta W = \alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \int_0^T M \omega_0 S dt, \quad (11)$$

где R_1 и R_2 – соответственно сопротивление в статорной и роторной цепях, Ом; $\alpha < 1$ – параметр, характеризующий уменьшение потерь при частотном управлении, когда частота и напряжение изменяются плавно, а не скачком, как в нерегулируемых приводах; S – скольжение.

Выражение (11) получено при допущении, что момент сопротивления M_c при переходных режимах равен нулю.

Потери электроэнергии при торможении управляемого привода также определяются по формуле (11), так как графики изменения момента при торможении и пуске отличаются только знаком. Следовательно, потери энергии при торможении равны потерям при пуске.

Тогда условие минимума потерь при переходных режимах

$$J_2 = \int_0^T M \omega_0 S dt \rightarrow \min. \quad (12)$$

Время переходного режима определяется по формуле

$$T = J \int_{\omega_{нач}}^{\omega_0} \frac{d\omega}{M},$$

где J – момент инерции двигателя, кг·м²; M – вращающий момент Н·м; $\omega_{нач}$, ω_0 – соответственно начальная и установившаяся угловые скорости двигателя, рад/с, а условие его минимума

$$J_3 = \int_{\omega_{нач}}^{\omega_0} \frac{d\omega}{M} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Считается, что переходной процесс закончился, когда скорость достигла 95% от ее установившегося значения, т.е. при $\omega = 0,95\omega_0$. В этом случае $S_{нач} = 1$, а $S_{уст} = 0,05$ [4].

Динамические параметры системы дифференциальных уравнений (6)-(8) определяются механической характеристикой привода, которая для асинхронных двигателей имеет нелинейный характер, поэтому для решения указанной системы уравнений ее представляют некоторым числом кусочно-линейных функций [5]. При этом линейные участки аппроксимированной характеристики должны быть ограничены кривой механической характеристики двигателя.

Уравнения (5)-(7) с указанными ограничениями (8) представляют собой управляемую систему, где функция $M(t)$ является законом управления. Закон управления, минимизирующий функционалы качества J_1, J_2, J_3 – это оптимальное управление переходными режимами работы ленточного конвейера. Определяемые при этом величины $W(t)$ и $V(t)$ являются оптимальными траекториями.

При оптимальном управлении приводом траектория $V(t)$ может подаваться с компьютера на вход частотного преобразователя, который в соответствии с ней будет изменять скорость движения конвейерной ленты. При этом можно добиться очень высокой точности выходного сигнала путем сравнения его со входным и при необходимости последующей корректировкой.

В установившемся режиме работы конвейера, когда скорость движения ленты достигает требуемого значения, колебания исходного грузопотока вызывают существенную перегрузку конвейерного полотна, что приводит к увеличению стоимости транспортирования и нерациональному использованию конвейерного транспорта.

В этой связи особую актуальность приобретает оптимальное управление технологической скоростью ленты с целью использования ее аккумулялирующей способности за счет стабилизации погонной нагрузки на уровне номинального значения.

Фактическая погонная нагрузка q_ϕ , грузопоток U и скорость V связаны соотношением

$$q = \varepsilon \frac{U}{V},$$

где ε – масштабный коэффициент.

Задача оптимального управления скоростью ленты в установившемся режиме с точки зрения стабилизации погонной нагрузки на уровне ее номинального значения q_n состоит в изменении скорости ленты в зависимости от поступающего грузопотока таким образом, чтобы фактическая нагрузка на ленту оставалась постоянной

$$q_\phi = q_n = \text{const.}$$

Тогда общее тяговое усилие привода W_0 и статический момент M_c также считаются постоянными

$$W_0 = \text{const}; \quad M_c = \text{const},$$

а потребляемая мощность P с изменением скорости изменяется

$$P = M_c \omega.$$

Регулирование скорости привода целесообразно осуществлять вниз от максимальной ω_{\max} , которой соответствует максимальная мощность

$$P_{\max} = M_c \omega_{\max}.$$

Вышеизложенное дает возможность разработать обобщенную математическую модель оптимального управления приводом от пуска до остановки ленточного конвейера. При этом управление электродвигателем может осуществляться при помощи частотных преобразователей, являющихся наиболее универсальным средством управления асинхронных двигателей как с фазным, так и с короткозамкнутым ротором. Частотные преобразователи позволяют с большой точностью управлять режимами работы конвейеров по заданным законам и в конечном итоге значительно снизить расходы на транспортирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жигула Т.И., Ладутина Л.П., Максютенко В.Ю. Математические модели оптимального управления приводом ленточного конвейера // Сб. науч. тр. "Геотехническая механика". - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. - 2003. - Вып. № 44. - С. 91-97.
2. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. - М.: Машиностроение, 1987 - 336 с.
3. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981 - 488 с.
4. Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский: Учебное пособие для вузов. - М.: Энергия, 1974. - 588с.
5. Смирнов В.К., Бужинский И.А., Неня В.П. Исследование пуска наклонного конвейера с учетом механических характеристик двигателя // Вопросы рудничного транспорта. - Киев: Наукова думка, 1974. - С. 69-85.