

УДК 622.647

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА ТИПА КСД

Кондрахин В.П., докт. техн. наук, проф.,

Борисенко В.Ф., канд. техн. наук, Мельник А.А., ДонНТУ,
Косарев В.В. канд. техн. наук, Стадник Н.И. докт. техн. наук,
Косарев И.В., Донгипроуглемаш

В статье рассмотрен вопрос моделирования и выбора рациональных алгоритмов пуска двухскоростных асинхронных электродвигателей забойного скребкового конвейера.

In this article the questions of a choice rational diagram switching of windings of two-speed induction motors are considered at start-up of the drag-chain conveyor.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Для привода шахтных скребковых конвейеров широко используются двухскоростные асинхронные электродвигатели [1]. Преимущества такого привода могут быть реализованы в полной мере только при рациональной организации пуска многодвигательного привода на первую и вторую скорости. Таким образом, проблема состоит в оптимизации пуска рассматриваемого привода на основе результатов натурных и вычислительных экспериментов с использованием разработанных математических моделей.

Анализ исследований и публикаций. Вопросам разработки математических моделей и исследованиям пусковых режимов скребковых конвейеров посвящены работы [2...5 и др.]. В работе [4] экспериментально установлено наличие существенной неравномерности распределения нагрузки между приводами двухприводного скребкового конвейера КСД27 в пусковых режимах. При этом в отдельные периоды времени (несколько десятков секунд) возможна работа одного из двигателей в генераторном режиме. Для выяснения причин такой несогласованной работы приводов и разработки путей ее устранения необходимо разработать математическую модель, адекватно отражающую свойства реальной системы.

Постановка задачи. В работе поставлена и решена задача моделирования процесса пуска двухприводного скребкового конвейера, оснащенного двухскоростными асинхронными электродвигателями.

Целями вычислительного эксперимента являются оценка адекватности разработанной математической модели и исследование закономерностей распределения нагрузки между приводами при пуске.

Изложение материала и результаты.

При разработке математической модели тяговый орган с грузом представлен как сосредоточенная масса, а его упруго-диссипативные свойства рассматривались в линейной постановке. Динамическая расчетная схема двухдвигательного привода, учитывающая упруго-диссипативные свойства привода и тягового органа, а также возможные зазоры, представлена на рис. 1.

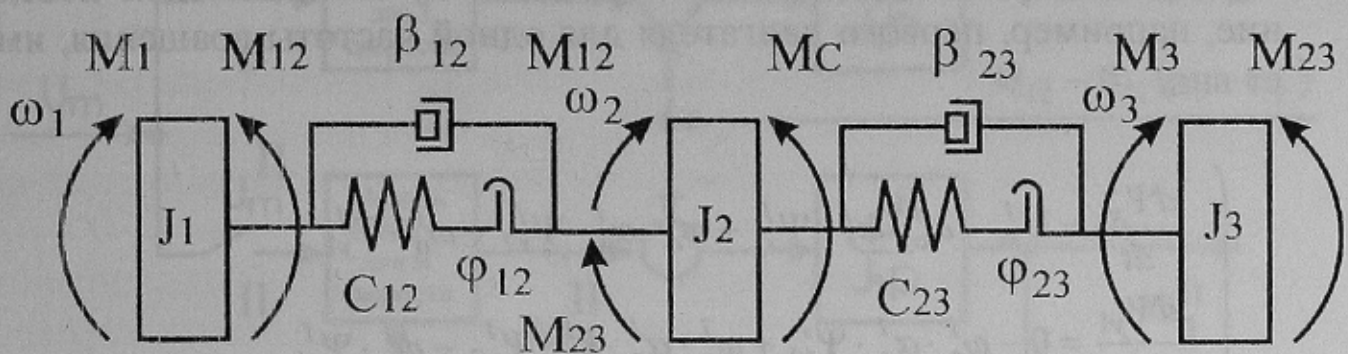


Рисунок 1. - Расчетная схема электромеханической системы двухдвигательного привода скребкового конвейера

На рисунке приняты следующие обозначения: J_1, J_3 – массовые моменты инерции роторов электродвигателя головного и хвостового приводов с приведенными к ним элементами редукторов; J_2 – приведенный к ротору двигателя момент инерции тягового органа с грузом; C_{12}, C_{23} – приведенные к роторам двигателей коэффициенты жесткостей соответственно рабочей и холостой ветви тягового органа с учетом податливости редукторов; $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ – приведенные зазоры в приводах; M_1, M_3 – моменты приводных электродвигателей.

С учетом принятых допущений динамика двухприводного скребкового конвейера описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M_1 - M_{12} - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = J_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} \\ M_{12} - M_{23} + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3) - M_C = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} \\ M_3 + M_{23} + \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3) = J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = J_3 \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь φ_i , ω_i – соответственно, углы поворота и угловые скорости i -ой массы, M_c – момент сил сопротивления движению тягового органа, β_{12} , β_{23} – коэффициенты сопротивления движению, соответственно, рабочей и холостой ветви тягового органа, $M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$, $M_{23} = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3)$ – упругий момент. Моменты инерции отдельных звеньев приведены к частоте вращения двигателя. Параметры ротора асинхронного двигателя для каждой из частот вращения приведены к статору двигателя.

Математическое описание электромагнитных переходных процессов в двухскоростном асинхронном двигателе выполнено на основе рекомендаций [5]. Система уравнений, описывающих поведение, например, первого двигателя для одной частоты вращения, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{x1}^I}{dt} = U_m^I - \omega_o^I \cdot \alpha_s^I \cdot \Psi_{x1}^I + \omega_o^I \cdot \alpha_s^I \cdot \Psi_{x2}^I + \omega_o^I \cdot \Psi_{y1}^I \\ \frac{d\Psi_{y1}^I}{dt} = 0 - \omega_o^I \cdot \alpha_s^I \cdot \Psi_{y1}^I + \omega_o^I \cdot \alpha_s^I \cdot k_r^I \cdot \Psi_{y2}^I - \omega_o^I \cdot \Psi_{x1}^I \\ \frac{d\Psi_{x2}^I}{dt} = -\omega_o^I \cdot \alpha_r^I \cdot \Psi_{x2}^I + \omega_o^I \cdot \alpha_r^I \cdot k_s^I \cdot \Psi_{x1}^I + (\omega_o^I - \omega_1^I) \cdot \Psi_{y2}^I \\ \frac{d\Psi_{y2}^I}{dt} = -\omega_o^I \cdot \alpha_r^I \cdot \Psi_{y2}^I + \omega_o^I \cdot \alpha_r^I \cdot k_s^I \cdot \Psi_{y1}^I - (\omega_o^I - \omega_1^I) \cdot \Psi_{x2}^I \\ M_1^I = \frac{3}{2} \cdot p^I \cdot \omega_o^I \cdot \frac{k_r^I}{x_s^I \cdot \sigma^I} \cdot (\Psi_{x2}^I \cdot \Psi_{y2}^I - \Psi_{x1}^I \cdot \Psi_{y1}^I) \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь Ψ_{x1}^I , Ψ_{y1}^I , Ψ_{x2}^I , Ψ_{y2}^I – потокосцепление статора и ротора соответственно по осям x , y для обобщенной двухфазной машины; α_s^I , α_r^I , k_s^I , k_r^I – коэффициенты связи статора и ротора; p^I – число пар полюсов обмотки; U_m^I – амплитудное значение величины питающего напряжения; ω_o^I – угловая скорость идеального холостого хода; ω_1^I – текущая угловая скорость ротора двигателя; M_1^I – электромагнитный момент двигателя. Верхний индекс I означает, что указанные параметры соответствуют низкой скорости (НС). Аналогично записывается система уравнений для работы двигателя на высокой скорости ВС (индекс II).

Рассматриваемая система уравнений (1) решалась численным методом совместно с системами дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в электродвигателях (см., например, систему (2)), для каждого числа пар полюсов [6]. Общий вид блок-схемы модели одного из двухскоростных двигателей приведен на рис.2.

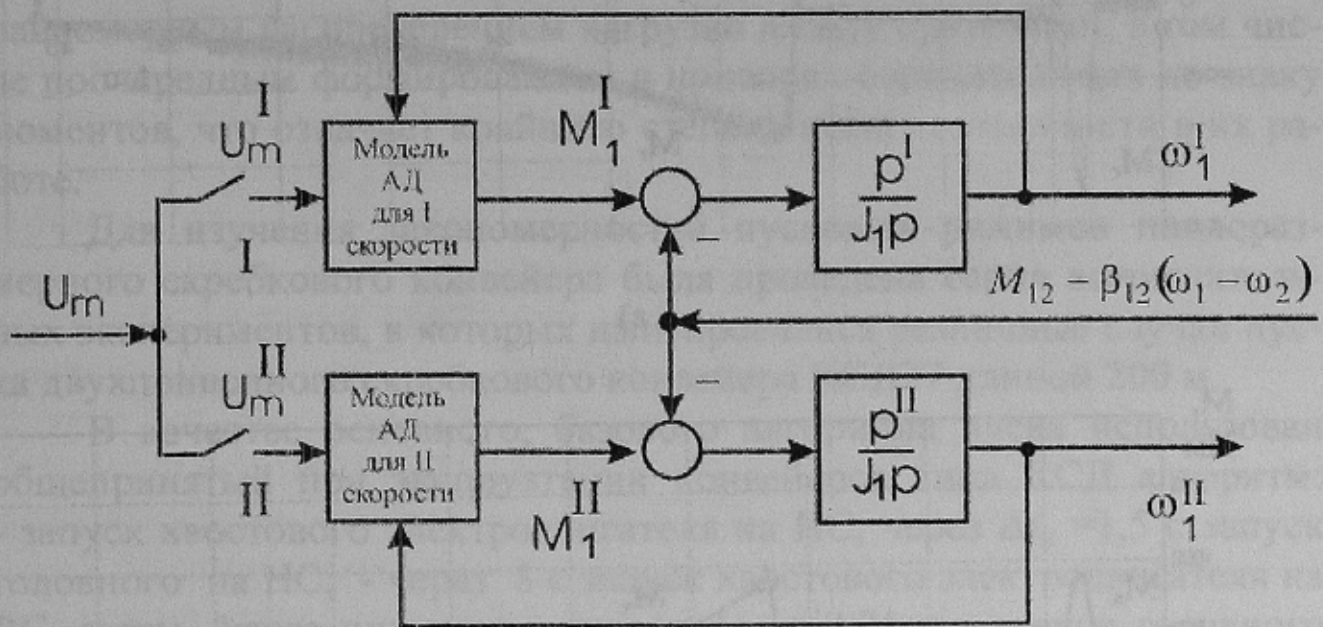
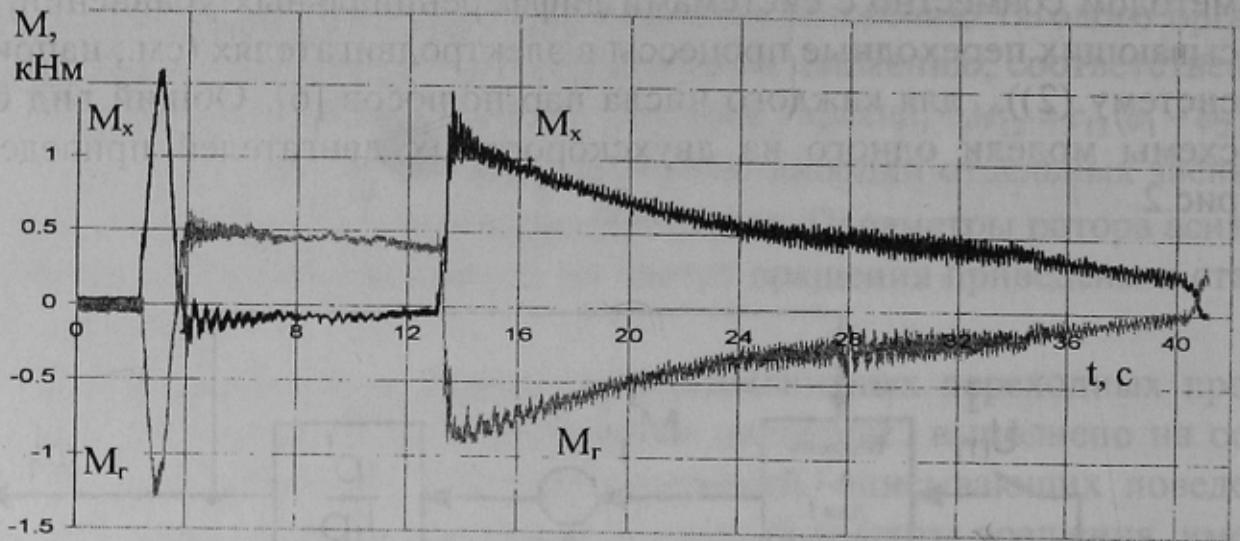
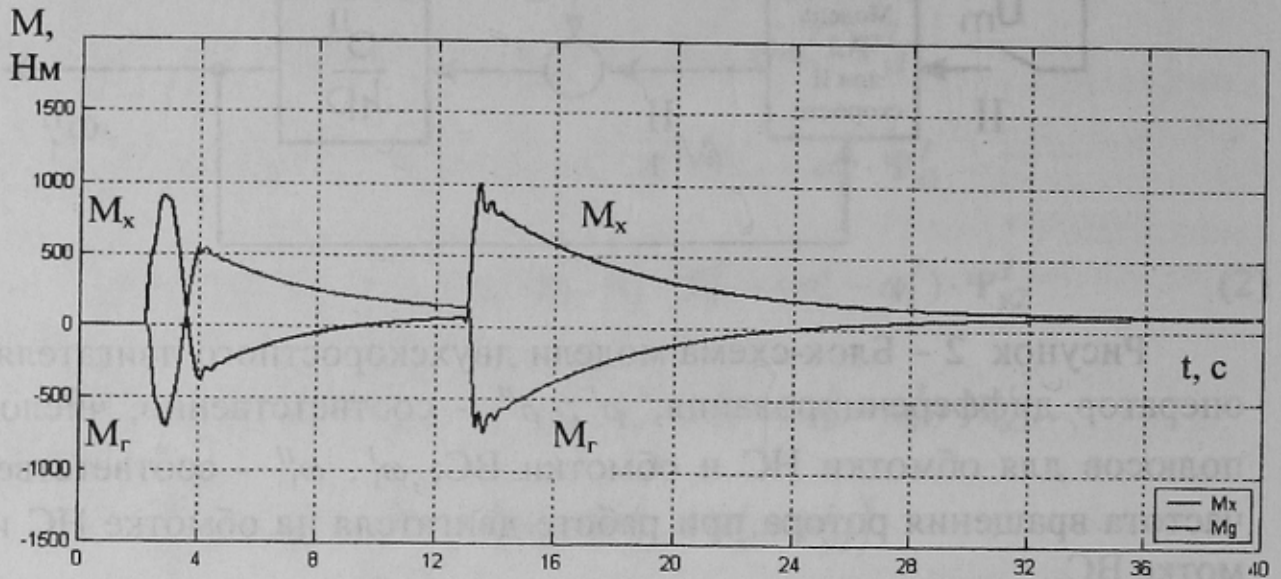


Рисунок 2 – Блок-схема модели двухскоростного двигателя: p – оператор дифференцирования; p^I, p^{II} – соответственно, число пар полюсов для обмотки НС и обмотки ВС; $\omega_1^I, \omega_1^{II}$ – соответственно, частота вращения ротора при работе двигателя на обмотке НС и обмотке ВС.

Для оценки адекватности разработанной модели конвейера использовались осциллограммы пуска на стенде завода-изготовителя незагруженного двухдвигательного конвейера КСД27 длиной 82 м при различных значениях времени задержки между пуском хвостового и головного двигателей на высокую скорость (ВС) (0,25 с и 0,05 с) [4]. Примеры осциллограмм приведенных к валу двигателя крутящих моментов в головном M_r и хвостовом M_x приводах, полученные в натурном и вычислительном экспериментах, показаны на рис. 3.



а)



б)

Рисунок 3 – Осциллограммы крутящих моментов в хвостовом M_x и головном M_r приводе при пуске двухприводного конвейера в натурном а) и вычислительном б) экспериментах.

Сравнение полученных осциллограмм показывает, что разработанная математическая модель скребкового конвейера в основном адекватно описывает динамические процессы, протекающие в электромеханической системе конвейера при пуске. Погрешность в определении основных параметров (крутящие моменты, токи двигателей, частоты вращения роторов) не превышает 20 %. Исключение составляет лишь величина пиков моментов при пуске на низкую скорость

(НС), которая в эксперименте получена равной 1,2 - 1,6 кНм, а при моделировании – 0,7 - 0,95 кНм. Такое различие может быть объяснено невозможностью точно определить и задать в модели коэффициент сопротивления движению цепи нового конвейера в начальный период движения.

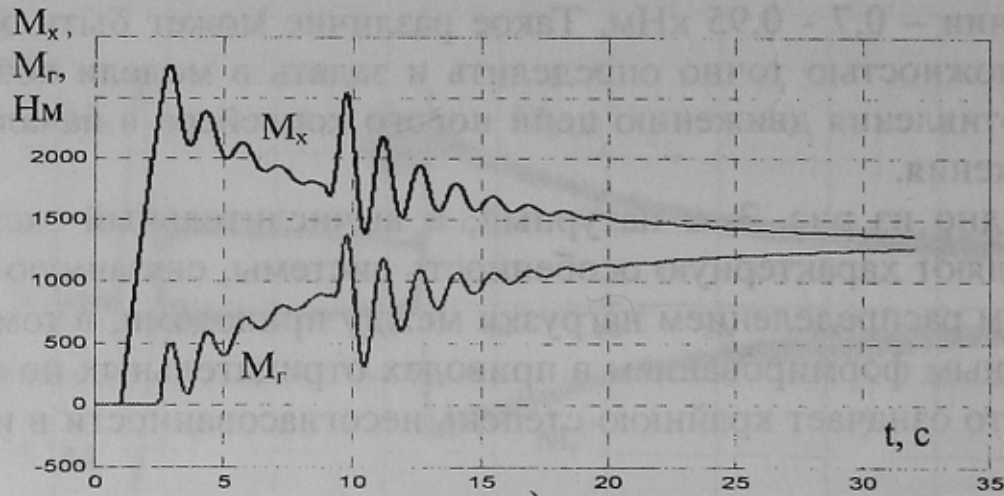
Как видно из рис. 3, и натурный, и вычислительный эксперименты выявляют характерную особенность системы, связанную с неравномерным распределением нагрузки между приводами, в том числе поочередным формированием в приводах отрицательных по знаку моментов, что означает крайнюю степень несогласованности в их работе.

Для изучения закономерностей пусковых режимов полноразмерного скребкового конвейера была проведена серия вычислительных экспериментов, в которых имитировались различные случаи пуска двухприводного скребкового конвейера КСД27 длиной 200 м.

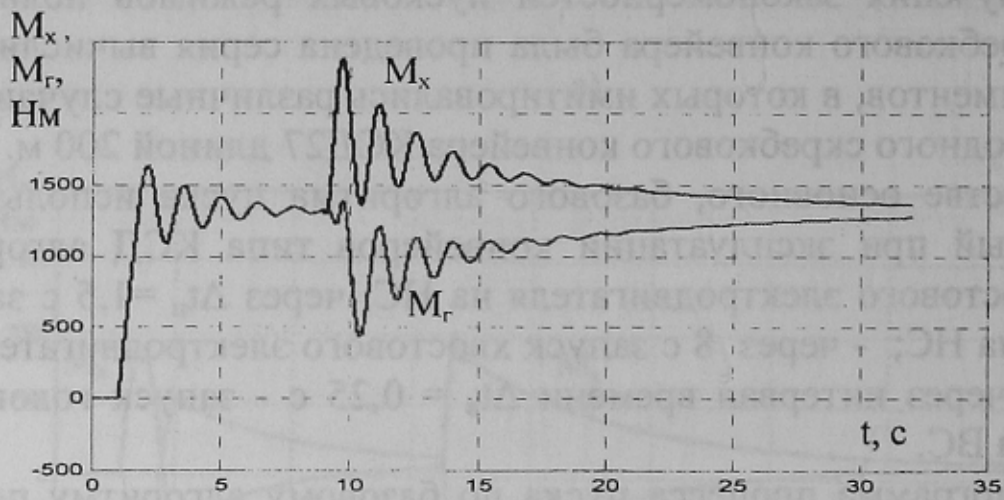
В качестве основного, базового алгоритма пуска использован общепринятый при эксплуатации конвейеров типа КСД алгоритм: - запуск хвостового электродвигателя на НС, через $\Delta t_n = 1,5$ с запуск головного на НС; - через 8 с запуск хвостового электродвигателя на ВС, затем через интервал времени $\Delta t_b = 0,25$ с - запуск головного двигателя на ВС.

Осциллограмма процесса пуска по базовому алгоритму полностью загруженного конвейера приведена на рис. 4а. Как видно из рисунка, процесс пуска и последующего выравнивания нагрузки между приводами продолжается свыше 30 с. В течение этого времени нагрузка хвостового привода существенно превышает нагрузку головного, однако тормозные моменты на головном приводе не возникают. Максимальный приведенный к валу двигателя момент в трансмиссии хвостового привода достигает 2700 Нм и формируется при разгоне на низкую скорость (НС). После выравнивания нагрузок приводов крутящий момент в каждом из приводов устанавливается на уровне 1300 Нм, что соответствует номинальному моменту двигателя.

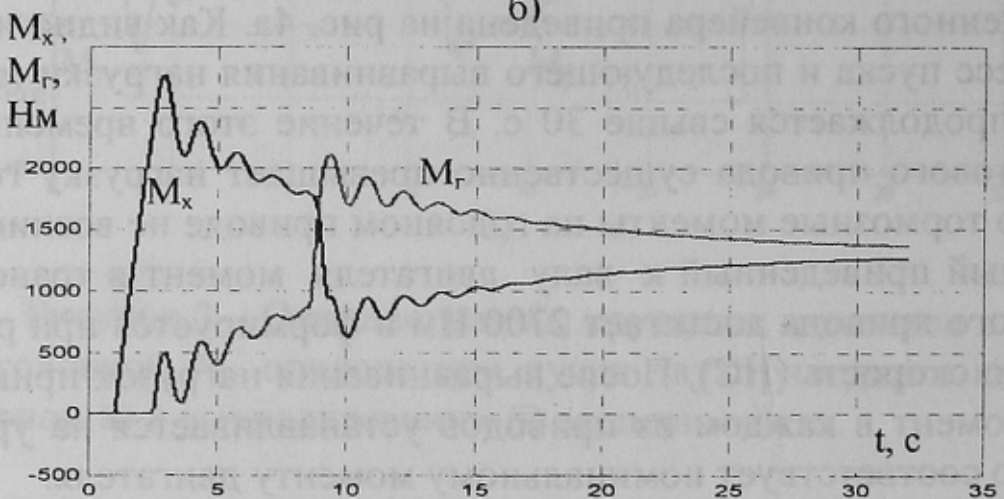
В рассматриваемом случае при пуске на НС пусковые токи обоих двигателей достигают 260А, а при переходе на ВС – ток хвостового двигателя - 1050 А, а головного – 880 А. Анализ осциллограммы угловых скоростей роторов двигателей показывает, что запускаемый первым хвостовой двигатель за 1,5 секунды не успевает деформировать холостую ветвь цепи и начать раскручивать ротор головного двигателя до включения статорной обмотки последнего на НС.



а)



б)



в)

Рисунок 4 - Осцилограмми крутящих моментов в хвостовом M_x и головном M_r приводе при пуске загруженного двухприводного конвейера длиной 200 м: а) базовый порядок пуска двигателей б) одновременный запуск на НС; в) обратная последовательность запуска на ВС.

При снижении степени загруженности конвейера нагрузки в обоих приводах уменьшаются, причем в головном приводе начинают формироваться тормозные моменты (отрицательные по знаку), и головной двигатель переходит в генераторный режим. При запуске незагруженного конвейера такой режим продолжается примерно 15 с. Во всех случаях выравнивание нагрузки между приводами происходит через 30-50 с.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что во всех случаях в период пуска нагрузка запускаемого первым хвостового привода существенно больше, чем головного. При частых пусках это будет приводить к его перегреву, ускорит накопление усталостных повреждений в редукторе по сравнению с головным приводом. Радикально решить проблему минимизации и выравнивания нагрузки при пуске можно за счет одновременного пуска двигателей. На рис. 4б приведены осциллограммы процесса пуска полностью загруженного двухприводного конвейера КСД27 длиной 200 м при одновременном включении двигателей на НС ($\Delta t_n = 0$). При этом крутящие моменты в обоих приводах при работе на НС полностью выравниваются и не превышают 1600 Нм, а суммарный пусковой ток не превышает 450 А. Как видно на рис. 4а и 4б, при одновременном запуске электродвигателей на НС максимальный момент в хвостовом приводе не превышает 2300 Нм, то есть на 15% меньше, чем при базовом алгоритме пуска.

Необходимо отметить, что на практике одновременный пуск на НС не используется из-за необходимости выбрать слабину цепи в точке сбегания на головном приводе. В связи с этим представляется целесообразным изменить алгоритм отключения приводных электродвигателей при остановке конвейера таким образом, чтобы хвостовой привод отключался от сети на 1,5 с позже головного. В этом случае слабина цепи у головного привода в процессе выбега при выключении конвейера будет выбираться. Тем самым, создаются предпосылки для последующего пуска конвейера с одновременным включением приводов на НС.

При одновременном включении двигателей на ВС, то есть при $\Delta t_v = 0$, процесс выравнивания нагрузки между приводами значительно сокращается (до 10-15 с). Однако в этом режиме суммарный ток двух двигателей достигает 1600 А, поэтому в реальных условиях питания от шахтных сетей этот режим не всегда может быть реализован.

При неможливості одночасного запуску, вирівняти навантаження і умови роботи хвостового і головного приводу в певній ступені можна за рахунок зміни черговості пуску на ВС – спочатку головний привод, а потім через 0,25 с хвостовий. Осцилограми динамічних процесів при такому режимі пуску конвеєра представлені на рис. 4 в. Порівняння кривих зміни крутячих моментів на рис. 4а (звичайна черговість включення) і на рис. 4в показує, що при змінній черговості до переходу на ВС навантажений в основному хвостовий привод, а після переходу на ВС основну навантаження бере на себе головний привод. Вказана закономірність зберігається при пуску частково навантаженого, а також незанесеного конвеєра. При цьому значно скорочується тривалість процесу вирівнювання навантаження між приводами. Суттєво скорочується (з 16 до 8 с) час роботи головного приводу в гальмівному режимі при пуску незанесеного конвеєра. Таким чином, для вирівнювання умов роботи приводів при пуску цілорозумно черговість включення двигунів на низьку і високу швидкості приймати різною. Іншими словами, якщо на ВС спочатку включається хвостовий двигун, а потім головний, то перехід на високу швидкість цілорозумно здійснювати в зворотному порядку.

Висновки і напрямлення подальших досліджень.

Розроблена математична модель двупровідного скребок-ового конвеєра, обладнаного двохшвидкісними електродвигунами, адекватно відображає основні особливості пускових режимів реальної системи. При запуску двупровідного конвеєра типу КСД27 навантаження розподіляється між приводами нерівномірно – в часі всього часу пуску найбільш навантажений запускається першим хвостовий привод. Ці явища виникають при неодновременному запуску двигунів на низьку і високу швидкості.

Обезпечити вирівнювання навантаження і умов роботи приводів можна за рахунок мінімізації затримки часу Δt_n і Δt_b пуску хвостового і головного двигунів. Ограничувальними факторами при цьому є: 1) наявність слабину ланки в точці збігання з головним зірочкою; 2) обмежена потужність живлячої підстанції.

Для забезпечення можливості одночасного пуску на низьку швидкість цілорозумно змінити алгоритм відключення приводних електродвигунів при зупинці конвеєра таким чином, щоб хвостовий привод відключався від мережі на 1,5 с пізніше головного. При

невозможности одновременного запуска головного и хвостового привода, выровнять их нагрузки и условия работы можно за счет изменения очередности пуска на высокую скорость – сначала головной привод, а затем примерно через 0,25 с - хвостовой.

Разработанную математическую модель целесообразно использовать для адаптации алгоритма запуска и остановки скребкового конвейера типа КСД к заданным условиям эксплуатации.

Следует продолжить исследования в направлении уточнения разработанной математической модели за счет учета взаимного влияния электромагнитных переходных процессов в обмотках низкой и высокой скорости, а также рассмотрения тягового органа как системы с распределенными параметрами.

Список источников.

1. Скребковые конвейеры нового технического уровня. Андреев Г.В., Косарев И.В., Лелека И.Т., Довженко В.И. // Уголь Украины.-2003.№9.-С. 36-38.
2. Чугреев Л.И. Динамика конвейеров с цепным тяговым органом.- М.: Недра, 1976.- 256с.
3. Скребковые конвейеры. Справочник / Под ред. А.В. Леусенко. - М.: Недра, 1992. – 221с.
4. Кондрахин В.П., А.А., Косарев В.В., Стадник Н.И., Косарев И.В. Экспериментальные исследования распределения нагрузки между приводами скребкового конвейера с двухскоростными асинхронными электродвигателями // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип.113, Серія: гірничо-електромеханічна.- Донецьк: ДонНТУ.- 2006.- С.131-138
5. Войтех А. А., Попович А. Н. Моделирование переходных процессов в полюсопереключаемых асинхронных двигателях. - Киев : Наук. думка, 1989.- 152 с.
6. Кондрахин В.П., Борисенко В.Ф., Мельник А.А., Косарев В.В., Стадник Н.И., Косарев И.В. Моделирование пусковых режимов двухдвигательного привода на базе двухскоростных асинхронных электродвигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету, вип.99, Серія: гірничо-електромеханічна.- Донецьк: ДонНТУ.- 2005.- С.104-110

Дата поступления статьи в редакцию: 23.04.07