

Метельков В.П., Либерман Я.Л.

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ РЕЖИМА ПУСКА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

В статье обсуждаются проблемы, связанные с пуском длинного ленточного конвейера, приводимого в движение асинхронным двигателем. Рассматриваются динамические нагрузки в ленте конвейера при пуске, вызывающие проскальзывание конвейерной ленты на тяговом барабане, ведущее к ее преждевременному износу. Актуальность темы связана с высокой стоимостью конвейерной ленты, достигающей 60% от стоимости всего конвейера и более. Целью работы является выяснение возможностей сокращения износа конвейерной ленты, в том числе за счет использования для этого возможностей, предоставляемых системой электропривода. Отмечается возможность снижения вероятности проскальзывания конвейерной ленты за счет увеличения начального натяжения ленты. Однако постоянное большое натяжение также ускоряет износ ленты. Для решения этой проблемы предлагается использование устройств автоматического регулирования натяжения, а также уменьшение динамических нагрузок в ленте путем использования устройств плавного пуска на основе тиристорного преобразователя напряжения, обеспечивающего регулирование амплитуды напряжения на статоре двигателя. Обсуждаются особенности нагрева асинхронного двигателя при пуске с постоянной скоростью вращения магнитного поля. Рассматривается взаимосвязь длительности пуска и нагрева статорной обмотки двигателя с динамическими нагрузками, возникающими в конвейерной ленте в пусковых режимах. Приводятся результаты моделирования, полученные с помощью пакета *Simulink*. Поскольку длительные пусковые режимы асинхронных электроприводов на основе тиристорных преобразователей напряжения могут приводить к перегреву двигателя, особенно при повторных пусках конвейера при полной нагрузке и в условиях жаркого климата, в пусковых режимах целесообразно использовать устройства автоматического регулирования натяжения ленты конвейера, обеспечивая этим уменьшение преждевременного износа ленты при снижении нагрева двигателя конвейера.

Ключевые слова: конвейер, асинхронный двигатель, устройство плавного пуска, динамические нагрузки, моделирование, тяговый фактор, обмотка статора, нагрев.

ВВЕДЕНИЕ

Ленточные конвейеры – один из наиболее распространенных видов транспортирующих машин. Они применяются в производстве стройматериалов и строительстве, металлургии и в горнодобывающей промышленности, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве... Предназначаются такие конвейеры для перемещения сыпучих и кусковых материалов и могут иметь различные конструкции. Тем не менее все они состоят из трех основных частей: головной, включающей в себя приводной барабан с механизмом его вращения и электродвигателем, средней, представляющей собой специальную металлоконструкцию с роликоопорами, и хвостовой, включающей в себя натяжной барабан с механизмом его линейного перемещения. Барабаны конвейера охвачены бесконечной (замкнутой) лентой, выполняющей функции несущего (транспортирующего) и тягового органа, причем ее верхняя ветвь является грузовой, а нижняя – холостой. Конвейерные ленты могут выполняться резинотканевыми и резинотросовыми. Первые состоят из 3–8 тканевых прокладок, между которыми находится резина, и используются для перемещения грузов на небольшие расстояния (до 150 м). Вторые представляют собой ряд параллельных тросов, защищенных резиновыми обкладками и используются в магистральных конвейерах (длиной до 2000 м). Ширина первых обычно не превышает 1 м, вторых иногда достигает 2 м.

Работают ленточные конвейеры в различных производственных и климатических условиях: на открытом воздухе и под землей, в отапливаемом и неотапливаемом помещении, при значительных колебаниях температуры окружающей среды, ее влажности и за-

пыленности. Работоспособность конвейеров в указанных условиях во многом определяется коэффициентом сцепления $K_{сц}$ ленты и барабана. Поэтому поверхность последнего в одних случаях выполняется гладкой стальной ($K_{сц}$ достигает 0,35), в других случаях футеруется прорезиненной лентой ($K_{сц}$ достигает 0,4) или даже просто резиной ($K_{сц}$ достигает 0,5). Но коэффициент $K_{сц}$ в процессе эксплуатации конвейера не остается постоянным. Лента вытягивается и изнашивается, поверхность барабана независимо от наличия футеровки также подвергается износу. В результате $K_{сц}$ может снизиться до величины 0,1 и менее, что, в свою очередь, может повлечь за собой проскальзывание ленты по барабану.

Величина $K_{сц}$ весьма существенно зависит от натяжения ленты, поэтому последнюю для гарантирования $K_{сц} = \max$ и предотвращения проскальзывания обычно выбирают с запасом. Однако, в таком случае возможно неоправданное перенапряжение ленты, приводящее к ее преждевременному старению. Как следствие, может потребоваться неплановая замена ленты и дополнительно к этому ремонт барабана. При этом не известно точно, какое начальное натяжение потребует каждый раз при изменении внешних условий (величины нагрузки, увлажнении ленты).

Экономические расчеты показывают, что стоимость ленты составляет в среднем 50...60% стоимости конвейера, а для шахтных конвейеров достигает 67% [1]. Статистические исследования, полученные при эксплуатации лент на предприятиях черной и цветной металлургии, дают следующее распределение видов разрушения ленты: рабочей обкладки – 56%, каркаса – 20%, бортов – 13% [2]. В [3] указывается, что экспериментальными исследованиями установлено, что на износ нижней обкладки, в том числе от пробуксовки,

для протяженных ленточных конвейеров составляет более 50% от всех видов износа. Таким образом, ускоренный износ ленты приводит к очень серьезным экономическим потерям.

Во избежание отмеченной выше проблемы, авторами статьи разработаны три варианта системы автоматического регулирования натяжения конвейерной ленты, обеспечивающие не максимальное, а необходимое и достаточное натяжение [4–6]. Сущность предложений базируется на сравнении угловых скоростей приводного и натяжного барабанов конвейера. Соотношение их скоростей изменяется при появлении проскальзывания ленты. В зависимости от результатов сравнения скоростей выполняется перемещение оси натяжного барабана, создающее требуемое натяжение. При использовании предлагаемых решений нет необходимости постоянно превышать натяжение в процессе работы конвейера, благодаря чему снижается износ ленты.

ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА И ПУТИ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

Конвейер представляет собой электромеханическую систему с упругим тяговым органом и распределённым по его длине параметрами: массами перемещаемого груза и тягового органа, усилиями сопротивления движению. Поэтому при пуске ленточных конвейеров большой длины происходит распространение упругих колебаний вдоль ленты. В этом случае динамические усилия суммируются со статическими и могут вызывать нарушение условий отсутствия проскальзывания ленты на барабанах, а также приводить к недопустимому увеличению нагрузок в звеньях механизма [7]. Колебательные явления в ленте приводят к сокращению срока ее службы [8], особенно опасны они при запуске нагруженного конвейера [9].

В процессе установившегося движения конвейера предложенные системы для автоматического регулирования натяжения ленты работают вполне удовлетворительно. Если, однако, пуск конвейера производится резко, то в их функционировании не исключены сбои, обусловленные запаздыванием начала вращения натяжного барабана из-за упругости ленты и инерционных нагрузок на нее. По этой причине, а также во избежание порывов ленты конвейеры, даже оснащенные предложенными системами регулирования, как правило, следует запускать достаточно плавно, ограничивая динамические нагрузки. Для решения задачи ограничения таких нагрузок и предотвращения проскальзывания ленты при пуске конвейеров, приводимых в движение асинхронными двигателями (АД), в современной практике используются устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН).

Моделирование показывает, что в разомкнутой системе асинхронного электропривода с УПП из-за волновых процессов при пуске длинных конвейеров не удается эффективно ограничить динамические нагрузки в конвейерной ленте. В результате амплитуда сил натяжения в конвейерной ленте при использовании УПП в разомкнутой системе электропривода мало отличается от случая прямого пуска из-за того, что не удается сформировать желаемую форму графика мо-

мента приводного двигателя в переходном процессе [10]. Наиболее эффективно использование УПП в замкнутых системах электропривода, что создает возможность целенаправленного формирования желаемой зависимости момента двигателя от времени. Структуры таких систем для приводов с АД хорошо отработаны в современной теории и практике электропривода, в том числе и для электроприводов, управляемых по амплитуде первой гармоники напряжения [11]. При этом имеется возможность строить системы электропривода с АД на основе ТПН с бездатчиковым формированием обратной связи по скорости, что повышает надежность функционирования системы [12].

На рис. 1 показаны результаты моделирования пуска под нагрузкой конвейера длиной 139 м с грузовым натяжным устройством, со скоростью движения ленты 1,6 м/с и производительностью 600 т/ч, приводимого в движение двигателем 4А225М4 мощностью 55 кВт. Лента моделировалась как звено с распределенными по длине параметрами.

Для оценки величины нагрузок в конвейерной ленте выбрана величина натяжения в зоне набегающей грузовой (верхней) ветви ленты на приводной барабан, где наблюдается наибольшая амплитуда сил натяжения. Процессы на рис. 1 построены для начального натяжения ленты $F_{нат0} = 16,7$ кН. На рис. 1 показаны графики отношения натяжений набегающей $S_{нб}$ и сбегающей $S_{сб}$ ветвей ленты при пуске в замкнутой по скорости системе с УПП и с темпом задатчика интенсивности, обеспечивающим разгон за 5, 10 и 50 с. Видно, что соотношение натяжений очень существенно зависит от темпа разгона. Отметим, что процессы для времени разгона 5 и 10 с, полученные на модели, не могли бы быть реализованы на практике из-за слишком больших максимумов отношения $S_{нб}/S_{сб}$, при которых будет возникать пробуксовка. Для отсутствия пробуксовки требуется, чтобы выполнялось условие $S_{нб}/S_{сб} < e^{\mu\alpha}$, где μ – коэффициент трения ленты о поверхность барабана; α – угол охвата лентой барабана, рад. Величину $e^{\mu\alpha}$, определяющую тяговую способность барабана, называют тяговым фактором. Для конструкции конвейера с одним приводным барабаном тяговый фактор имеет величину порядка 3,0 [13].

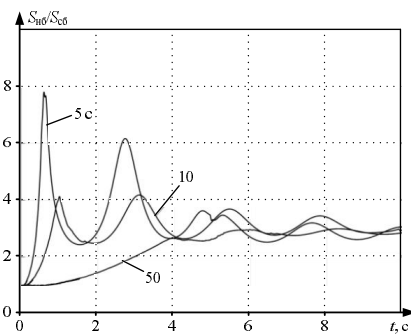


Рис. 1. Графики отношения натяжений набегающей и сбегающей ветвей ленты для продолжительности пуска 5, 10 и 50

Таким образом, для обеспечения требуемой плавности разгона конвейера и эффективного снижения динамических нагрузок в конвейерной ленте необходимо задавать достаточно большое время пуска. Однако при длительном процессе пуска в системе ТПН-АД приходится сталкиваться с быстрым нарастанием температуры обмоток АД, что вызывается большой величиной греющих потерь, выделяющихся при низких скоростях в процессе пуска, происходящего при постоянной скорости вращения магнитного поля АД.

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИВОДНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОНВЕЙЕРОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПУСКЕ

Выясним связь между темпом нарастания скорости и нагревом обмоток АД в системе с УПП на основе ТПН. Будем рассматривать нагрев обмотки статора, так как эта обмотка изолированная, что увеличивает подверженность ее последствиям термических перегрузок. Получим выражения для повышения температуры обмотки статора при пуске $\Delta\theta_s$. Оно определяется выделившейся энергии $W_{\Sigma s}$ и ушедшей в охлаждающую обмотку статора среду $W_{s.out}$:

$$\Delta\theta_s = \frac{W_{\Sigma s} - W_{s.out}}{C_s}, \quad (1)$$

$$W_{\Sigma s} = \int_0^{t_n} \Delta P_{\Sigma s} dt, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\Sigma s}$ – суммарная мощность потерь в обмотке статора; C_s – теплоемкость обмотки статора.

$$W_{s.out} = \int_0^{t_n} \sum_{k=1}^m (\theta_s - \theta_{sk}) \lambda_{s,ok} dt. \quad (3)$$

В состав энергии $W_{\Sigma s}$, кроме энергии W_s , входят еще джоулевы потери от гармоник тока статора ($W_{\Sigma s} = k_{s,n} W_s$), где $k_{s,n}$ – коэффициент, учитывающий потери в обмотке статора от высших гармоник в случае работы электропривода с тиристорным преобразователем напряжения).

Подъем средней температуры обмотки статора при адиабатическом нагреве запишем как

$$\Delta\theta_s' = W_{\Sigma s} / C_s. \quad (4)$$

Энергию, отдаваемую в окружающую среду, можно представить следующим образом:

$$W_{s.out} = \int_0^{t_n} \lambda_{s.out}(t) [\Delta\theta_s(t) - \Delta\theta_{s.out}(t)] dt. \quad (5)$$

где $\lambda_{s.out}(t)$ – теплоотдача от обмотки статора в окружающую среду; $\Delta\theta_s(t)$ – зависимость от времени превышения средней температуры обмотки статора над начальным значением; $\Delta\theta_{s.out}(t)$ – зависимость от времени превышения средней температуры окружающей среды над начальным значением.

$$\Delta\theta_{s.out} = \frac{\sum_{i=1}^l \Delta\theta_{s.out,i} \lambda_{s.out,i}}{\sum_{i=1}^l \lambda_{s.out,i}}, \quad (6)$$

где $\Delta\theta_{s.out,i}$ – превышение температуры i -го элемента окружающей среды, к которому направлен тепловой поток от ротора; $\lambda_{s.out,i}$ – теплопроводность от ротора к i -му элементу окружающей среды; l – количество элементов, к которым уходит тепловой поток от ротора.

Обозначим

$$\lambda_{s.out}^*(t) = \frac{\lambda_{s.out}(t)}{\lambda_{s.outN}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{s.outN}$ – теплоотдача от обмотки статора в окружающую среду при номинальной скорости двигателя.

Если обозначить $\Delta\theta_s(t) - \Delta\theta_{s.out}(t)$ как $k_{\theta s} \Delta\theta_s(t)$, то можно записать выражение (1) с учетом (4), (5) и (7) как

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta_s' - \frac{\bar{k}_{\theta s}}{T_{s.outN}} \int_0^{t_n} \lambda_{s.out}^*(t) \Delta\theta_s(t) dt, \quad (8)$$

где $\bar{k}_{\theta s}$ – усредненное за время пуска значение коэффициента $k_{\theta s}$, а $T_{s.outN} = C_s / \lambda_{s.outN}$ – отношение теплоемкости обмотки статора к суммарной теплоотдаче от нее к окружающим элементам и охлаждающему воздуху при номинальной скорости.

Зависимость относительной теплоотдачи $\lambda_{s.out}^*(t)$ можно аппроксимировать выражением

$$\lambda_{s.out}^*(t) = a_{\lambda s} + b_{\lambda s} \frac{\omega^{\beta_s}(t)}{\omega_N^{\beta_s}}, \quad (9)$$

где $a_{\lambda s}$, $b_{\lambda s} \equiv 1 - a_{\lambda s}$ и β_s – константы.

Решение интегрального уравнения, математически идентичного уравнению (8), было получено в [14]. Следуя [14], получим решение уравнения (8) в виде

$$\chi_s = \frac{k_{\theta s}}{T_{s.outN}}; \quad B_s = \frac{b_{\lambda s}}{n\beta_s + 1} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^{\beta_s}.$$

Рассмотрим влияние продолжительности пуска привода в системе ТПН-АД на нагрев обмотки статора. Энергию, выделяющуюся в обмотке статора АД при пуске с постоянной скоростью вращения магнитного поля, можно представить следующим образом [15]:

$$W_s = \frac{1}{k_t^2} \cdot \frac{R_s}{R_{r\epsilon}} W_r, \quad (11)$$

где k_t – усредненное отношение тока ротора к току статора при пуске; $R_{r\epsilon}$ – усредненное значение сопротивления ротора с учетом вытеснения тока.

Используя соотношение (11), можно из выражения (10) получить условие, при котором увеличение продолжительности пуска за счет уменьшения ограничения тока статора (в системе, замкнутой по току статора) или за счет уменьшения темпа задатчика интенсивности (в системе, замкнутой по скорости) будет приводить к снижению нагрева обмотки:

$$W_k > \frac{W_{rc}}{-\chi_s t_n (a_{\lambda s} + B_s)}, \quad (12)$$

где W_c – доля энергии, выделяющейся за время пуска в обмотке ротора, определяемая работой по преодолению момента сопротивления со стороны механизма; W_k – кинетическая энергия, запасаемая в маховых массах привода за время разгона.

Отметим, что соотношение (12) носит очень приближенный характер. Можно получить более точные соотношения для оценки возможности влиять на нагрев обмотки статора посредством управления пуском АД с помощью ТПН. Представим соотношение (4) как

$$\Delta\theta'_s = \frac{W_{s, const} + W_{s, var}}{C_s}, \quad (13)$$

где $W_{s, const}$ – составляющая выделившейся в обмотке статора энергии, не зависящая от времени пуска; $W_{s, var}$ – составляющая, пропорциональная времени пуска.

Обозначим $\bar{P}_{s, var} = W_{s, var} / t_{пн}$. Тогда можем представить (10) как

$$\Delta\theta_s = \frac{W_{s, const} + \bar{P}_{s, var} t_{пн}}{C_s [1 - \chi_s t_{пн} (a_{\lambda s} + B_s)]}. \quad (14)$$

Для того чтобы при увеличении продолжительности пуска максимум температуры обмотки статора уменьшался, необходимо выполнение условия $d\Delta\theta/dt_{пн} < 0$. Не представляет трудности убедиться, что это условие достигается при выполнении условия

$$W_{s, const} > \frac{\bar{P}_{s, var}}{-\chi_s (a_{\lambda s} + B_s)}. \quad (15)$$

Оценим выполнение условия (12) для привода конвейера. Известны выражения для потерь энергии в обмотке статора АД при пуске в системе ТПН-АД с заданным ускорением [16, 17]:

$$W_{\Sigma s} = \frac{k_{s, n} \Delta P_{sN} M \omega_0 (D_1 - D_2)}{\varepsilon M_N}, \quad (16)$$

где ΔP_{sN} – номинальная мощность потерь в обмотке статора; ε – ускорение; s_N и $s_{кон}$ – номинальное и конечное скольжение; $D_1 = [(1-A)/2s_N](1-s_{кон}^2)$; $D_2 = As_N \ln(s_{кон})$; $A \approx (I_0/I_{sN})^2$ [18].

Вызвав момент двигателя как $M = J_{\Sigma np} \varepsilon + M_c$, а также $\varepsilon = \omega_{кон} / t_{пн}$ из (16) получим:

$$W_{s, const} = \frac{k_{s, n} \Delta P_{sN} J_{\Sigma np} \omega_0 (D_1 - D_2)}{M_N}, \quad (17)$$

$$\bar{P}_{s, var} = \frac{k_{s, n} \Delta P_{sN} M_c \omega_0 (D_1 - D_2)}{\omega_{кон} M_N}. \quad (18)$$

Из (12), а также (17) и (18) вытекает, что при разгоне в системе ТПН-АД с постоянными величинами момента двигателя и момента сопротивления снижение темпа разгона приведет к снижению нагрева обмотки статора только при выполнении условия

$$J_{\Sigma np} > \frac{M_c}{-\chi_s (a_{\lambda s} + B_s) \omega_{кон}}. \quad (19)$$

При параметрах упомянутого выше привода конвейера условие (19) выполнялось бы только, если бы величина $J_{\Sigma np}$ превышала $580 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, в то время как она составляет лишь $2,8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ при полной загрузке ленты. Следовательно, при таком соотношении параметров привода, а оно весьма типично для конвейерных электроприводов, при уменьшении темпа разгона нагрев обмотки статора будет только возрастать, что и подтверждается моделированием. Также отметим, что при пуске после аварийного останова с короткой паузой максимальная температура обмотки может оказаться существенно выше, чем при пуске из холодного состояния. Это хорошо видно на **рис. 2**, где показано изменение температуры элементов двигателя после перезапуска из нагретого состояния при температуре окружающей среды 25°C и начальном натяжении ленты $F_{нат0} = 16,7 \text{ кН}$. Здесь обозначены температуры: 1 и 2 – лобовых и пазовых частей обмотки статора; 3 – усредненная температура ротора; 4 – стали статора; 5 – станины. Здесь важно учитывать, что превышение температуры изоляции обмотки двигателя над допустимым значением температуры для данного класса нагревостойкости приводит к удвоению скорости термического старения изоляции на каждые $8...10^\circ\text{C}$ превышения. Отметим, что в двигателе 4A225M4 используется изоляция с классом нагревостойкости F, для которой по ГОСТ допустимая температура составляет 155°C .

Таким образом хорошо видно, что попытка снизить динамические нагрузки в ленте и вероятность пробуксовки за счет снижения темпа разгона приводит к увеличению нагрева двигателя. Эта закономерность отражена на **рис. 3**, где представлены результаты моделирования механических процессов конвейерной ленты и термодинамических процессов в приводном двигателе 4A225M4 при разных величинах темпа разгона (каждая точка на этом рисунке соответствует определенному темпу разгона, для которого показаны значения максимума $S_{\text{нп}}/S_{\text{сб}}$ и максимума температуры лобовых частей обмотки статора ($\theta_{\text{лб, макс}}$) при однократном пуске из холодного состояния при $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$). Здесь обозначено: $\square - F_{\text{нат0}} = 15,0 \text{ кН}$; $\circ - F_{\text{нат0}} = 16,5 \text{ кН}$; $\Delta - F_{\text{нат0}} = 18,0 \text{ кН}$, пунктиром показаны тренды, штрих-пунктирные линии указывают на пересечение трендом уровня тягового фактора $e^{\text{нп}} = 3,0$. На **рис. 3** видно, что стремление снизить соотношение натяжений $S_{\text{нп}}/S_{\text{сб}}$ при пуске за счет снижения темпа разгона до приемлемого по условиям пробуксовки значения может привести к очень сильному нагреву обмотки статора.

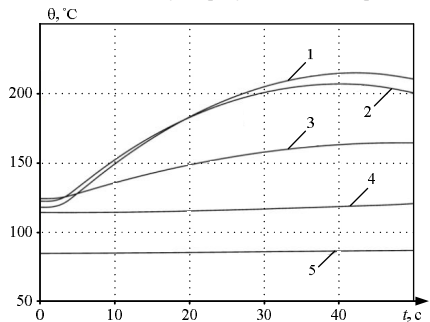


Рис. 2. Температура элементов двигателя при перезапуске

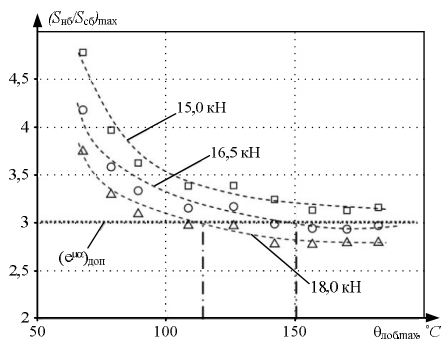


Рис. 3. Максимумы $S_{нб}/S_{сб}$ и $\theta_{нб, макс}$ при различном темпе разгона конвейера

Как следует из рис. 3, снизить нагрев обмотки статора при использовании УПП на основе ТПН можно за счет сокращения времени запуска. Однако для предотвращения пробуксовки при этом потребуется снизить максимум отношения $S_{нб}/S_{сб}$ в процессе разгона. С этой целью возможно использование упомянутых выше технических решений, обеспечивающих автоматическую коррекцию величины натяжения ленты, что позволяет использовать более быстрый разгон, снижая тем самым нагрев двигателя к концу пуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналитическим путем, а также с использованием компьютерного моделирования для асинхронных электроприводов конвейеров показано следующее:

- для ограничения динамических нагрузок в пусковых режимах конвейеров и ограничения проскальзывания ленты требуется использовать замкнутые системы электропривода, обеспечивающие возможность организации плавного пуска;
- длительные пусковые режимы асинхронных электроприводов на основе ТПН могут приводить к перегреву двигателя, особенно при повторных пусках конвейера при полной нагрузке и в условиях жаркого климата;
- с целью обеспечения возможности ускорения пусковых процессов конвейера при отсутствии проскальзывания и преждевременного износа ленты, а также снижения нагрева двигателя конвейера в пусковых режимах целесообразно использовать устройства автоматического регулирования натяжения ленты конвейера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика выбора параметров резинотканевых конвейерных лент для карьеров и дробильных фабрик предприятий чёрной металлургии при помощи ЭВМ. Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1982. 28 с.

2. Полунин В.Т., Гуленко Г.Н. Эксплуатация мощных конвейеров. М.: Недра, 1986. 344 с.
3. Кожубаев Ю.Н. Снижение интенсивности изнашивания транспортируемых лент протяженных конвейеров средствами электропривода с нечетким регулятором: автореф. дис. ... к.т.н. 05.09.03. СПб., 23 с.
4. Пат. на полезную модель № 96565 Российская Федерация, МПК В65G 23/44 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147425/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.
5. Пат. на полезную модель № 96564 Российская Федерация, МПК В65G 15/28 (2006.01). Ленточный конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147427/22, заявл. 21.12.2009; опубл. 10.08.2010, бюл. № 22.
6. Пат. на полезную модель № 97721 Российская Федерация, МПК В65G 23/44 (2006.01). Конвейер / Я.Л. Либерман, В.П. Метельков. № 2009147433/11, заявл. 21.12.2009; опубл. 20.09.2010, бюл. № 26.
7. Галкин В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запенин, Е.Е. Шешко. М.: Горная книга, Изд-во Моск. гос. горного ун-та, 2011. 545 с.
8. Дмитриев В.Г., Галкин В.И. Исследование динамических нагрузок на роликоопоры грузочных и линейных секций ленточных конвейеров при транспортировании крупных кусков // Изв. вузов. Горный журнал. 1975. № 1. С. 108–112.
9. Турпишева М.С., Дульгер Н.В., Пенский В.К. Проблемы надежности ленточных конвейеров портовых зерновых терминалов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, 2015. № 1. С. 109–112.
10. Зюзев А.М., Метельков В.П. Исследование пусковых режимов электропривода конвейеров // Электротехника. 2009. № 9. С. 41–45.
11. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
12. Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Методы косвенной оценки скорости двигателей в системах ТПН-АД // Электротехника. 2009. № 9. С. 45–49.
13. Шахмистер Л.Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
14. Зюзев А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 60–67.
15. Асинхронные двигатели общего назначения / Е.П. Бойко, Ю.В. Гайнец, Ю.М. Ковалев и др.; под ред. В.М. Петрова, А.Э. Кравчика. М.: Энергоатомиздат, 1980. 488 с.
16. Браславский И.Я., Ишматов, З.Ш. Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
17. Браславский И.Я., Зюзев А.М. Опыт внедрения тиристорных электроприводов с фазовым управлением // Автоматизированный электропривод. Вып. 3. Свердловск: ЦНТИ, 1981. 47 с.
18. Браславский И.Я. О снижении энергопотребления асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения // Электричество. 1988. № 11. С. 58–60.

Поступила в редакцию 06 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CHOOSING THE BELT CONVEYER START MODE

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Yakov L. Liberman

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Machines and Tools, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ya.l.liberman@urfu.ru

The paper is concerned with the problems associated with starting a long conveyor driven by an induction motor. We consider the dynamic loads in the conveyor belt during start-up, which cause slippage of the conveyor belt on the traction drum leading to its premature deterioration. The relevance of the topic is associated with the high cost of the conveyor belt reaching 60% of the cost of the entire conveyor and more. The aim of the work is to ascertain the possibilities of reducing the wear of the conveyor belt, for example, through the use of the possibilities provided by the system of the electric drive. The possibility of reducing the probability of the conveyor belt slippage by increasing the initial belt tension is noted. However, constant high tension also accelerates belt deterioration. To solve this problem, the use of automatic tension control devices is proposed, as well as the reduction of dynamic loads in the belt by using soft starters based on a thyristor voltage converter, which regulates the amplitude of voltage on the motor stator. The features of an asynchronous motor heating when starting with a constant speed of rotation of the magnetic field are discussed. The interrelation between the start-up duration and the motor stator winding heating with the dynamic loads occurring in the conveyor belt in start-up modes is considered. Modeling results obtained using the *Simulink* package are presented. Since long start-up modes of asynchronous electric drives based on thyristor voltage converters can lead to motor overheating, especially when the conveyor is restarted under full load and in hot climates, it is advisable to use automatic conveyor belt tension control devices during start-up modes thereby reducing premature belt deterioration together with a decrease in the conveyor motor heating.

Keywords: conveyor, induction motor, soft-starter, dynamic loads, modeling, traction factor, stator winding, heating.

REFERENCES

1. Metodika vybora parametrov rezinotkaneynykh konveyernykh lent dlya karyerov i drobnitsnykh fabrik predpriyatiy chornoy metallurgii pri pomoshchi EVM [Methods of selection of parameters of rubber-fabric conveyor belts for quarries and crushing factories of ferrous metallurgy enterprises using a computer]. Sverdlovsk: IGD MCHM USSR, 1982. 28 p. (In Russian)
2. Polunin V.T., Gulenko G.N. *Eksploatatsiya moshchnykh konveyerov* [Exploitation of powerful conveyors]. Moscow: Nedra, 1986. 344 p. (In Russian)
3. Kozhubayev YU.N. *Snizheniye intensivnosti iznashivaniya transportnykh lent protyazhennykh konveyerov sredstvami elektroprivoda s nechetkimi regulyatorom* [Reducing the wear rate of conveyor belts of long conveyors by means of an electric drive with a fuzzy regulator. Abstract of Ph.D. diss.]. St. Petersburg, 2016. 23 p.
4. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Lentochnyy konveyer* [Belt conveyor]. Patent RF, no. 96565, 2010. Bull. no. 22.
5. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Lentochnyy konveyer* [Belt conveyor]. Patent RF, no. 96564, 2010. Bull. no. 22.
6. Liberman Ya.L., Metelkov V.P. *Konveyer* [Conveyor]. Patent RF, no. 97721, 2010. Bull. no. 26.
7. Galkin V.I., Dmitriyev V.G., Dyachenko V.P., Zapein I.V., Sheshko Ye.Ye. *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornykh predpriyatiy* [Modern theory of belt conveyors of mining enterprises]. Moscow: Gornaya kniga Publ, 2011. 545 p. (In Russian)
8. Dmitriyev V.G., Galkin V.I. Investigation of dynamic loads on roller support of loading and linear sections of belt conveyors during transportation of large pieces. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. [University news. Mountain Journal], 1975, no 1, pp. 108–112. (In Russian)
9. Turpishcheva M.S., Dulger N.V., Penskiy V.K. Issues of reliability of belt conveyors of port grain terminals. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Astrakhan State Technical University]. Series: Marine Engineering and Technology, 2015, no. 1, pp. 109–112. (In Russian)
10. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. [Study of Start-Up Modes of Conveyor Drives]. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2009, no. 9, pp. 41–45. (In Russian)
11. Braslavskiy I.Ya. *Asinkhronnyy poluprovodnikovyy elektroprivod s parametricheskimi upravleniyem* [Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 224 p. (In Russian)
12. Zyuzev A.M., Nesterov K.Ye. Methods for indirect estimation of motor speed in TVC-IM systems. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2009, no. 9, pp. 45–49. (In Russian)
13. Shakhmeyer L.G., Dmitriyev V.G. *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyors]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987. 336 p. (In Russian)
14. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. Analytical Method for Evaluation of High-Voltage Induction Motor Rotor Winding Heating at Start-Up Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 60–67. (In Russian)
15. Boyko Ye.P., Gaintsev Yu.V., Kovalev Yu.M., et al. *Asinkhronnyye dvigateli obshchego naznacheniya* [Asynchronous motors of general purpose], under the editorship of V.M. Petrov, A.E. Kravchik. Moscow: Energoatomizdat, 1980. 488 p. (In Russian)
16. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov, Z.Sh. Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Moscow: Publishing Center "Academy", 2004. 256 p. (In Russian)
17. Braslavskiy I.Ya., Zyuzev A.M. *Opyt vnedreniya tiristornykh elektroprivodov s fazovym upravleniyem* [Experience in the implementation of thyristor drives with phase control]. Automated electric drive. Issue 3. Sverdlovsk: CNTI, 1981. 47 p. (In Russian)
18. Braslavskiy I.Ya. [Reducing the energy consumption of asynchronous electric drives with thyristor voltage converters]. *Elektrichestvo* [Electricity], 1988, no. 11, pp. 58–60. (In Russian)

Метельков В.П., Либман Я.Л. К вопросу о выборе режима пуска ленточного конвейера // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2(43). С. 54-59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59)

Metelkov V.P., Liberman Ya.L. Choosing the Belt Conveyor Start Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 54-59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2\(43\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-54-59)