

Ю. А. Василенко, инженер (РУП «Беларуськалий»)

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТРАКТА ПОДАЧИ РУДЫ
ПРОТЯЖЕННОСТЬЮ БОЛЕЕ 6 КМ**

We consider the automated two motor electric drive of the conveyers, more then 6 km long, on the basis of frequency converters with the vector type of control.

Введение. Республиканское унитарное предприятие «Беларуськалий» является одним из крупнейших производителей калийных удобрений в мире. Основной вид деятельности предприятия заключается в добыче полезных ископаемых, производстве и реализации минеральных удобрений. Доля его продаж на рынке составляет 17%.

В настоящее время для пополнения сырьевой базы ведется строительство Краснослободского рудника. Руда до сильвинитовой обогатительной фабрики Второго рудоуправления будет доставляться по конвейерному тракту общей протяженностью более 6 км. В состав тракта входят три конвейера: № 1 длиной 3045 м, № 2 длиной 3260 м и № 3 длиной 350 м. Максимальная производительность достигает 2000 т/ч. Конвейеры подобной длины являются уникальными для Республики Беларусь.

Объектом рассмотрения данной статьи является электропривод конвейеров № 1 и 2.

Основная часть. Для расчета мощности приводного электродвигателя необходимо найти окружное (тягловое) усилие на ободу приводного барабана (общее усилие сопротивления движению ленты) загруженного горизонтального конвейера [1]:

$$P = K_d L_r \omega (q_r + qp' + qp'' + 2q_{л.ср}), \quad (1)$$

где K_d – коэффициент, учитывающий дополнительные сопротивления; L_r – длина горизонтальной проекции конвейера, м; ω – коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам и барабанам; qp' , qp'' – линейные нагрузки (даН/м), зависящие от массы вращающихся частей роликоопор соответственно верхней и нижней ветвей ленты, численно равные массам вращающихся частей соответствующих роликоопор, кг/м; $q_{л.ср}$ – средняя линейная нагрузка (даН/м) от массы ленты, численно равная среднему значению массы, кг/м.

Расчетную мощность двигателя привода (кВт) вычисляют по формуле

$$N = \frac{PvK}{102\eta}, \quad (2)$$

где v – скорость ленты, м/с; K – коэффициент неучтенных потерь; η – общий КПД привода.

Двухдвигательная система привода конвейера позволила использовать двигатели с меньшей номинальной мощностью и повысить надежность

работы привода. Одним из требований, предъявляемых к мощности электропривода, было обеспечение производительности 60% от номинальной при работе с одним двигателем.

Таким образом, были приняты двигатели номинальной мощностью 800 кВт каждый, обеспечивающие максимальную производительность 2000 т/ч при скорости движения ленты 3,15 м/с.

В нынешних условиях жесткой экономии энергоресурсов остро стоит вопрос о минимизации их потребления. Для работающего практически в круглосуточном режиме конвейерного транспорта выход один – регулирование скорости движения для обеспечения максимальной загрузки ленты.

Загрузка конвейерного тракта может осуществляться двумя путями: кратцер-краном со склада руды и непосредственно с отделения дробления. Однако при любом варианте руда на транспортер подается неравномерно.

Данные о нагрузке с тензометрических весов, установленных в начале тракта, передаются на микропроцессорный контроллер (МПК) Simatic S7-300. Управляющим сигналом для регулируемого электропривода является задание скорости, которая изменяется в зависимости от нагрузки в начале тракта.

Применение регулируемого электропривода позволяет не только уменьшить потребление энергии электроприводом в установившемся режиме и в переходных процессах, но и в целом повысить качество технологического процесса. Чтобы реализовать возможность экономии электроэнергии в регулируемом электроприводе, необходимо понимать процессы управляемого электромеханического преобразования энергии.

Параметры, необходимые для расчета характеристик и энергетических показателей асинхронных электроприводов, можно определить из анализа математической модели эквивалентного двухфазного асинхронного двигателя в осях xu [2]:

$$\begin{aligned} u_{1x} &= i_{1x} R_1 + \frac{d\Psi_{1x}}{dt} - \omega_1 \Psi_{1y}, \\ u_{1y} &= i_{1y} R_1 + \frac{d\Psi_{1y}}{dt} - \omega_1 \Psi_{1x}, \\ 0 &= i'_{2x} R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_1 - \omega_{эл}) \Psi_{2y}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$0 = i'_{2y} R'_2 + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} - (\omega_1 - \omega_{эл}) \Psi_{2x},$$

$$M = \frac{3}{2} p_n k_r (i_{1y} \Psi_{2x} - i_{1x} \Psi_{2y}).$$

Для управления скоростью был однозначно выбран частотный способ как наиболее перспективный и широко используемый в настоящее время метод регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. Частотно-регулируемый привод обеспечивает поддержание с высокой точностью скорости вращения двигателя. Регулирование частоты вращения в этой системе может осуществляться плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики, т. е. двигатель может иметь частоту вращения, большую номинальной, давая при этом возможность регулировать скорость разгона и остановки. Такой «мягкий» пуск двигателя имеет массу преимуществ: снижаются ударные нагрузки на двигатель и оборудование во время пуска, полностью исключаются броски пускового тока. Ввиду этого уменьшаются механические нагрузки на двигатель и оборудование, что соответственно увеличивает их срок службы, и межремонтный цикл.

Частотное регулирование является весьма экономичным, так как регулирование частоты вращения двигателя в этой системе не сопровождается большими потерями скольжения в роторной цепи, ухудшающими КПД электропривода и приводящими к необходимости завышения мощности двигателя. При этом регулировочные характеристики имеют необходимую жесткость, а двигатель сохраняет высокую перегрузочную способность.

В качестве приводов ленточных конвейеров № 1 и 2 используются по два трехфазных асинхронных двигателя фирмы АЕМ. Двигатели специально предназначены для создания комплектных частотно-регулируемых приводов. Номинальная мощность двигателя составляет 800 кВт. Номинальное напряжение переменное трехфазное 690 В «звезда». Двигатели работают в комплекте с преобразователями частоты (ПЧ) фирмы АВВ типа ACS 800-07-1160-7.

Задание скорости, подача сигналов пуска/останова двигателей, считывания скоростей, нагрузок и состояния (работа, готовность, авария) электроприводов конвейеров выполняется по сети Profibus-DP. Для этого в преобразователи частоты установлена плата РРВА-01. Поскольку применяется двухдвигательный привод конвейеров, необходимо было распределить нагрузку между двигателями. Преобразователи частоты ACS 800-07-1160-7 позволяют решить эту задачу без использования МПК. Для этого были выполнены следующие операции.

1. В частотном преобразователе в платы управления RМIO установлены специальные платы RDCO-02 для организации связи Master/Slave между преобразователями частоты.

2. Один из преобразователей частоты сделан ведущим с управлением скоростью.

3. Второй преобразователь установлен ведомым с управлением моментом от ведущего привода.

4. Ведущий и ведомый приводы соединены оптоволоконной линией связи.

Таким образом, важно было решить две основные задачи: управление скоростью вращения и моментом двигателя. Необходимость регулирования момента была продиктована техническими и технологическими требованиями. Для нормального функционирования привода следует регулировать момент и ток двигателя в переходных процессах пуска, торможения и приложения нагрузки. При работе конвейера в однодвигательном режиме механизм будет испытывать значительные перегрузки, что требует необходимости непрерывного регулирования момента двигателя в целях ограничения динамических ударных нагрузок.

Для решения задач регулирования скорости и момента применяют два основных метода частотного управления:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, при отсутствии датчика скорости на валу двигателя невозможно регулировать скорость вращения вала, так как она зависит от нагрузки. Во-вторых, нельзя регулировать момент на валу двигателя. Более того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент и скорость [3].

Устранить недостатки, присущие скалярному управлению, позволяет метод векторного управления. Хорошие силовые полупроводниковые приборы и мощные системы обработки информации современных электроприводов дают возможность закладывать в систему управления математическую модель двигателя, которая позволяет рассчитывать момент на валу и скорость вращения вала.

Используемые ПЧ фирмы АВВ поддерживают так называемый режим DTC (Direct Torque Control), т. е. прямое управление электромагнитным моментом двигателя. Суть этого метода заключается в следующем.

1. Магнитный поток статора рассматривается как интеграл от ЭДС статора, поэтому его величина определяется приложенным к статору напряжением.

2. Развиваемый электромагнитный момент двигателя пропорционален синусу угла между

потокосцеплениями статора и ротора (векторное представление электромагнитного момента).

3. Действие потокосцепления ротора на изменение напряжения статора меньше, чем действие потокосцепления статора.

Таким образом, величина потокосцепления статора и развиваемый двигателем электромагнитный момент непосредственно управляются с помощью создания пространственного вектора напряжения статора. Вектор напряжения статора формируется надлежащим выбором последовательного включения-отключения (состояния) силовых ключей ПЧ. Для оптимизации процесса переключения силовых ключей инвертора используется векторная пространственная широтно-импульсная модуляция (ШИМ).

В системе прямого управления моментом двигателя на основе векторной ШИМ применяется синхронно вращающаяся система координат с ориентацией оси x вдоль вектора потокосцепления статора $\dot{\Psi}_1$. Математическая модель асинхронного двигателя в синхронно вращающейся системе координат xu независимо от ориентации осей относительно какого-либо вектора определяется уравнением (3). Если ось x системы координат xu направить вдоль вектора потокосцепления статора $\dot{\Psi}_1$, тогда:

$$\Psi_{1x} = \Psi_1, \quad \Psi_{1y} = 0 \quad (4)$$

и уравнение (3) примет вид

$$\begin{aligned} u_{1x} &= i_{1x}R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}, \\ u_{1y} &= i_{1y}R_1 + \omega_1\Psi_{1x}, \\ 0 &= i'_{2x}R'_2 + \frac{d\Psi_{2x}}{dt} - (\omega_1 - \omega_{эл})\Psi_{2y}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$0 = i'_{2y}R'_2 + \frac{d\Psi_{2y}}{dt} - (\omega_1 - \omega_{эл})\Psi_{2x},$$

$$M = \frac{3}{2} p_n i_{1y} \Psi_{1x}.$$

После ряда преобразований уравнение математической модели асинхронного двигателя в синхронно вращающихся осях xu при ориентации потокосцепления статора $\dot{\Psi}_1$ вдоль оси x можем записать:

$$u_{1x} = i_{1x}R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt},$$

$$u_{1y} = i_{1y}R_1 + \omega_1\Psi_1,$$

$$\Psi_1 + T_2 \frac{d\Psi_1}{dt} = L_1 \left(i_{1x} + T_2 \frac{di_{1x}}{dt} + \sigma T_2 \Delta\omega_{эл} i_{1y} \right), \quad (6)$$

$$\Psi_{1x} = \Psi_1,$$

$$\Psi_{1y} = 0,$$

$$M = \frac{3}{2} p_n i_{1y} \Psi_1,$$

где T_2 – электромагнитная постоянная времени цепи ротора.

По уравнению (6) составляется функциональная схема прямого управления моментом с вычислителем скорости. После проведения так называемого индефикационного прогона двигателя в систему управления вводятся необходимые компенсирующие сигналы.

Закключение. Использование векторного управления позволило достичь следующих результатов:

- высокая точность регулирования скорости ведущего двигателя;
- безынерционное поддержание момента на валу ведомого двигателя;
- плавный, без рывков, разгон и останов двигателей, особенно в области малых частот;
- быстрая реакция на изменение нагрузки, т. е. при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости;
- обеспечен режим работы двигателей, при котором снижены потери на нагрев и намагничивание.

Настройка параметров, выбор макросов, контроль работы и управление частотными преобразователями конвейеров может выполняться по сети Profibus-DP.

Литература

1. Шахмейстер, Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 318 с.
3. Усольцев, А. А. Векторное управление асинхронными двигателями / А. А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ, 2002. – 424 с.