УДК 621.313-57: 621.313.3

В.П. Обрусник, Т.В. Горлова

Проблемы надежного пуска шахтных конвейеров

Проанализированы семь способов пуска шахтных конвейеров. Показан наилучший способ обеспечения надежного пуска двигателя с минимальными динамическими перегрузками при максимально возможном темпе разгона. Обоснованы параметры и схемные решения системы автоматического управления электроприводом.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, индуктивное сопротивление, ёмкость, пусковой ток, естественная механическая характеристика.

Анализ предыдущих исследований. Шахтные конвейеры, транспортирующие добываемый уголь к подъему на поверхность, имеют электроприводы довольно большой мощности. Например, в шахте «Заречная» в г. Белово Кемеровской обл., 250, 315, 400 кВт при напряжении линейном 660 В. При длине штрека 1 км стоят 3 конвейера, имеющих 11 двигателей (4×250 + 4×315 + 3×400) кВт. Большая длина кабеля, подводящего напряжение к двигателям, приводит к большим падениям напряжения при пусках – (25÷30)% от номинального значения, что не всегда обеспечивает нормальный пуск при полной загрузке углем конвейера. Начинают «раскачку» до нескольких десятков пусков, пока не преодолеется момент сопротивления покоя, который всегда больше номинального [1]. Эти пуски плохо сказываются на двигателе, часто его вообще не удается запустить. Поэтому проблема надежного пуска актуальна.

Проанализируем способы надежного запуска шахтных конвейеров.

Схема замещения фазы электрического питания асинхронного двигателя (АД) конвейера приведена на рис. 1.

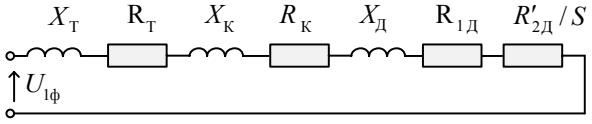

Рис. 1. Схема замещения фазы системы электропитания АД конвейера: Т – трансформатор; К – кабель; Д – двигатель; $R_Т = R_{1Т} + R'_{2Т}$

Способы надежного пуска АД:

1-й способ: компенсация индуктивных сопротивлений $X_Т$, $X_К$, $X_Д$ за счет $-X_C$, емкости, последовательно включенной в каждую фазу [2]. При этом обеспечивается естественная механическая характеристика (МХ), когда:

а) $X_C = X_К + X_Т$, (остается $X_Д$);

б) $X_C = X_Т + X_К + 2X_Д$,

здесь $X_Д$ становится со знаком «–», что обеспечивает естественная МХ при меньшем значении емкости.

Вариант «б» можно считать лучшим. Если принять $X_C = X_Т + X_К + X_Д$, что обеспечивает полную компенсацию $X_{L\Sigma}$, то остаются только активные сопротивления, и пусковой ток АД становит-ся недопустимым (в 2÷3 раза больше, чем $I_{1кз}$ естественной МХ).

Для варианта «б» потребуется значение (величина) емкости

$$|X_C| = \frac{1}{\omega \cdot C} = X_Т + X_К + 2X_Д, \text{ где } \omega = 2\pi f_1,$$

отсюда следует

$$C = \frac{1}{\left(X_Т + X_К + 2X_Д\right) \cdot 2\pi f_1} \text{ [Ф], где } f_1 = 50 \text{ Гц.}$$

2-й способ: увеличение выходного (вторичного) напряжения питающего трансформатора за счет выбора другого стандартного трансформатора (если это возможно) или включения вольтодобавочного трансформатора (подобрать стандартный или изготовить) [2, 3].

Требуемое новое значение $U_{1ф}$, принимается $U'_{2ф} \cong U_{1ф}$

Возможны два варианта получения требуемого $U_{1ф}$:

а) из условия получения одинаковых значений пускового тока естественной МХ ($I_{1ке}$):

$$I_{1ке} = \frac{U_{1фн}}{\sqrt{X_Д^2 + R_Д^2}}; \quad (1)$$

где $R_Д = R_{1Д} + R'_{2Д}$;

$$I_{1ки} = \frac{U_{1ф}}{\sqrt{\left(X_Д + X_Т + X_К\right)^2 + \left(R_Д + R_Т + R_К\right)^2}} = \frac{U_{1ф}}{Z_{ки}}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), получаем $\frac{U_{1фн}}{Z_{ке}} = \frac{U_{1ф}}{Z_{ки}}$, откуда следует

$$U_{1ф} = U_{1фн} \cdot \frac{Z_{ки}}{Z_{ке}}; \quad (3)$$

$$U_{1ф} = U_{1фн} \cdot \sqrt{\frac{\left(X_Д + X_Т + X_К\right)^2 + \left(R_Д + R_Т + R_К\right)^2}{X_Д^2 + R_Д^2}}; \quad (4)$$

б) из условия одинаковых значений критического и пускового момента на естественной МХ:

$$M_{ке} = \frac{3U_{1фн}^2}{2\omega_0\left(\sqrt{X_Д^2 + R_Д^2} + R_Д\right)} = \frac{3U_{1фн}^2}{2\omega_0\left(Z_{ке} + R_Д\right)}; \quad (5)$$

$$M_{ки} = \frac{3U_{1ф}^2}{2\omega_0\left(\sqrt{\left(X_Д + X_Т + X_К\right)^2 + \left(R_Д + R_Т + R_К\right)^2} + R_{\Sigma ц}\right)} = \frac{3U_{1ф}^2}{2\omega_0\left(Z_{ки} + R_{\Sigma ц}\right)}. \quad (6)$$

Приравнивая правые части выражений (5) и (6), получаем: $\frac{U_{1фн}^2}{Z_{ке} + R_Д} = \frac{U_{1ф}^2}{Z_{ки} + R_{\sum ц}}$, отсюда следует

$$U_{1ф} = \sqrt{\frac{Z_{ки} + R_{\sum ц}}{Z_{ке} + R_Д}} \cdot U_{1фн}. \quad (7)$$

Сравнение значений $U_{1ф}$, требуемых для нормального пуска АД по естественной МХ, получаемых по формулам (3) и (7), позволяет сделать вывод, что $U_{1ф\ по\ (7)} < U_{1ф\ по\ (3)}$.

Для пуска АД более целесообразным выбрать вариант $U_{1ф\ по\ (3)}$, так как при этом пусковой ток останется таким же, как на естественной МХ, но пусковой момент увеличится:

$$M_{Пи} = M_{Пе} \cdot \left(\frac{Z_{ки}}{Z_{ке}}\right)^2 \cdot \frac{Z_{ке} + R_Д}{Z_{ки} + R_{\sum ц}}; \quad (8)$$

$$M_{Пи} \cong M_{Пе} \cdot \frac{Z_{ки}}{Z_{ке}}. \quad (9)$$

Примерно, так как при $Z_{ке} >> R_Д$, $Z_{ки} >> R_{\Sigma ц}$.

Итак, необходимое напряжение для нормального пуска должно быть равным:

$$U_{1ф} = U_{1фн} \cdot \frac{Z_{ки}}{Z_{ке}}.$$

3-й способ. Увеличение мощности приводных двигателей [2, 3]. Для определения новой (увеличенной) мощности АД для нормального его запуска по естественной МХ, следует воспользоваться двумя выражениями:

а) новая мощность $P_{1и} = 3U_{1ф} \cdot I_{1фн} \cdot \cos\varphi_и \cdot \eta_и$;

б) номинальная мощность на естественной МХ, которая выбрана для АД:

$$P_{1н} = 3U_{1фн} \cdot I_{1фн} \cdot \cos\varphi_н \cdot \eta_н ,$$

здесь $U_{1ф}$ по выражению (3); $\cos\varphi_н$, $\eta_н$ – номинальные значения коэффициента мощности и КПД АД; $\cos\varphi_и$, $\eta_и$ – коэффициент мощности и КПД реальной схемы АД;

$$\frac{P_{1и}}{P_{1н}} = \frac{U_{1ф} \cdot I_{1фн} \cdot \cos\varphi_и \cdot \eta_и}{U_{1фн} \cdot I_{1фн} \cdot \cos\varphi_н \cdot \eta_н} = \frac{U_{1ф} \cdot \cos\varphi_и \cdot \eta_и}{U_{1фн} \cdot \cos\varphi_н \cdot \eta_н}. \quad (12)$$

Подставим выражения:

$$\cos\varphi_н = \frac{X_Д}{R_{Дн}} = \frac{X_Д}{R'_2/S_н + R_{1Д}}, \qquad \eta_н = \frac{R'_{2Д}/S_н}{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д}};$$

$$\cos\varphi_и = \frac{X_Д + X_Т + X_К}{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К}, \ \eta_и = \frac{R'_2/S_н}{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К};$$

$$\frac{P_{1и}}{P_{1н}} = \frac{U_{1ф}}{U_{1фн}} \cdot \frac{X_Д + X_Т + X_К}{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К} \cdot \frac{R'_{2Д}/S_н}{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К} \cdot \frac{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д}}{X_Д} \cdot \frac{R'_{2Д}/S_н + R_{1Д}}{R'_{2Д}/S_н}.$$

После преобразований получаем:

$$\frac{P_{1и}}{P_{1н}} = \frac{U_{1ф}}{U_{1фн}} \cdot \frac{\left(R'_{2Д}/S_н + R_{1Д}\right)^2}{\left(R'_{2Д}/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К\right)^2} \cdot \frac{X_Д + X_Т + X_К}{X_Д}. \quad (13)$$

С учетом $U_{1ф}$ по формуле (3): $U_{1ф} = U_{1фн} \cdot \frac{Z_{ки}}{Z_{ке}}$;

$$P_{1и} = P_{1н} \frac{Z_{ки}}{Z_{ке}} \left(\frac{R'_2/S_н + R_{1Д}}{R'_2/S_н + R_{1Д} + R_Т + R_К} \right)^2 \cdot \frac{X_Д + X_Т + X_К}{X_Д}, \quad (14)$$

где $Z_{ки} = \sqrt{\left(X_Д + X_Т + X_К\right)^2 + \left(R_Д + R_Т + R_К\right)^2}$; $Z_{ке} = \sqrt{X_Д^2 + R_Д^2}$.

Для реальных параметров $P_{1и} \geq 1{,}5 P_{1н}$. В реальных условиях это нецелесообразно!

4-й способ. Если статорная обмотка двигателя включена по схеме «звезда», тогда нужно её переключить в «треугольник». При этом потребляемая мощность АД не изменится, ток в фазе уменьшится, а напряжение увеличится в $\sqrt{3}$ раз [2, 3]. Ожидаемое повышение напряжения $U_{1ф}$ в $\sqrt{3} \cdot 0{,}75 \cong 1{,}25$ раз. Здесь 0,75 – снижение напряжения при пуске за счет потерь в кабеле. Это не опасно, но пусковой момент увеличится против естественного значения в $(1{,}25)^2 \cong 1{,}56$ раза (рис. 2).

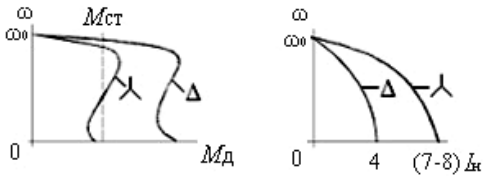

Рис. 2. Сравнение МХ при включении по схеме «звезда» и «треугольник»

5-й способ. Включение в каждую фазу статора АД по два встречно включенных ключа, например тиристоров (рис. 3), позволит управлять процессом пуска без толчков, плавно, и уменьшить напряжение после разгона АД, что обеспечит при том же моменте нагрузки на валу (например, номинальном), уменьшенное потребление мощности из сети [2, 3].

6-й способ. Включение регулятора частоты со звеном постоянного тока (АИН или АИТ) [1, 2]. Инвертор требуется на каждый АД (на шахте «Заречная» их: 3×400 кВт + 4×315 кВт + 4×250 кВт = = 3460 кВт). Это очень дорого и ради пуска, так как скорость регулировать не требуется, нецелесообразно!

7-й способ. Пуск по методу профессора Д.И. Родькина (КрНУ, Украина). Требуется включение в каждую фазу статора АД по симистору или по два встречно включенных управляемых диода, например, тиристора. Диодам обеспечивается квазичастотное управление, при котором ступенчато

понижается частота в 2, 3 или более раза при $U_{1ф}/f_1$ = const с возможностью плавного регулирования напряжения для ограничения пускового тока [2, 3].

Пусковой момент при этом увеличивается, обратно пропорционально частоте (рис. 4).

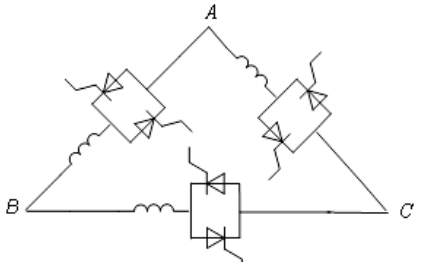

Рис. 3. Схема включения в каждую фазу статора АД по два встречно включенных тиристора

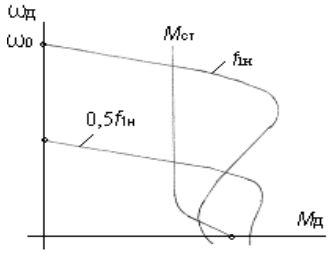

Рис. 4. МХ при включении в каждую фазу статора АД тиристора

После запуска АД управляемые вентили можно отключить.

Заключение. В результате исследования седьмой способ является наилучшим для надежного запуска шахтных конвейеров с минимальными динамическими перегрузками при максимально возможном темпе разгона.

Литература

1. Тиристорный электропривод рудничных и взрывозащищённых электроустановок / под ред. А.И. Пархоменко. – М.: Недра, 1991. – 173 с.

2. Чиликни М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликни, А.С. Сандлер. – М.: Энергоатомиздат. 1981. – 576 с.

3. Обрусник В.П. Электрические машины: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 207 с.

Обрусник Валентин Петрович
Д-р техн. наук, профессор кафедры промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: (382-2) 42-30-16
Эл. почта: vai@ie.tusur.ru

Горлова Татьяна Валентиновна
Ст. преп. каф. информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Украина
Тел.: (8-10-380-53-66) 2-60-25
Эл. почта: gorlova58@list.ru

Obrusnik V.P., Gorlova T.V.

Problems of reliable starting of mine conveyers

Seven methods of starting of mine conveyers are analysed in the paper. The best method of providing of the reliable engine starting is shown with minimum dynamic overloads at the maximally possible rate of acceleration. The parameters and schematics of the automated control system of an electric drive are proved.

Keywords: asynchronous motor, inductive resistance, capacity, starting current, natural mechanical description.