

УДК 62-83

### ОЦЕНКА УМЕНЬШЕНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

**В. М. Чермалых, Л. В. Торопова, А. В. Торопов, А. С. Бычковский**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: liliaya@ukr.net

Приведен один из основных способов модернизации шахтных подъемных установок с электроприводом на базе асинхронных двигателей с фазным ротором. Рассмотрены основные схемы подключения преобразовательных устройств для регулирования скорости асинхронных двигателей, указаны преимущества и недостатки их применения. Предложена схема подключения асинхронного двигателя с фазным ротором по схеме машины двойного питания. Преобразователи частоты включаются в цепи статора и ротора, при этом для формирования поля возбуждения используется более дешевый тиристорный преобразователь частоты. Произведен анализ снижения установленной мощности асинхронной машины при возбуждении переменным током. Рассмотрены причины уменьшения электромагнитного момента машины, а также целесообразность использования преобразователей частоты со стороны статора и ротора. Выведены аналитические зависимости для электромагнитного момента и тока ротора при работе двигателя в режиме машины двойного питания, при этом выражения получены как функции перегрузочной способности двигателя, а также функции угла опережения. Рассчитаны процентные соотношения падения момента электродвигателя при номинальном токе ротора и увеличения тока при обеспечении номинальной нагрузки. Приведены рекомендации по использованию предложенной системы электропривода при модернизации электроприводов шахтных подъемных установок.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, установленная мощность, возбуждение, двойное питание, анализ.

### ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ПРИ ЗБУДЖЕННІ ЗМІННИМ СТРУМОМ

**В. М. Чермалых, Л. В. Торопова, А. В. Торопов, О. С. Бичківський**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: liliaya@ukr.net

Наведено один з основних способів модернізації шахтних підйомних установок з електроприводом на базі асинхронних двигунів із фазним ротором. Розглянуто основні схеми підключення перетворювальних пристроїв для регулювання швидкості асинхронних двигунів, вказано переваги та недоліки їх застосування. Запропоновано схему підключення асинхронного двигуна з фазним ротором за схемою машини подвійного живлення. Перетворювачі частоти включаються в ланцюги статора й ротора, при цьому для формування поля збудження використовується більш дешевий тиристорний перетворювач частоти. Проведено аналіз зниження встановленої потужності асинхронної машини при порушенні змінним струмом. Розглянуто причини зменшення електромагнітного моменту машини, а також доцільність використання перетворювачів частоти з боку статора й ротора. Виведено аналітичні залежності для електромагнітного моменту й струму ротора при роботі двигуна в режимі машини подвійного живлення, при цьому вирази отримано як функції перевантажувальної здатності двигуна, а також функції кута випередження. Розраховано процентні співвідношення падіння моменту електродвигуна при номінальному струмі ротора та збільшення струму при забезпеченні номінального навантаження. Наведено рекомендації щодо використання запропонованої системи електроприводу при модернізації електроприводів шахтних підйомних установок.

**Ключові слова:** вентильний двигун, встановлена потужність, збудження, подвійне живлення, аналіз.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Развитие полупроводниковой техники в конце прошлого века дало возможность развивать электроприводы переменного тока. Это коснулось как развития новых электро-механических систем, так и модернизации уже существующих. Одним из направлений, где полупроводниковые преобразователи параметров электрической сети используются именно для модернизации систем электропривода, являются шахтные подъемные установки. Так, в прошлом веке в подъемных установках на шахтах широкое распространение

получили асинхронные машины (АМ) с фазным ротором. Регулирование скорости этих двигателей осуществлялось с помощью введения добавочного сопротивления в цепь ротора [1]. В настоящее время такие системы крайне неэффективны с энергетической точки зрения и подлежат модернизации. При этом выводы низковольтных обмоток ротора замыкаются накоротко, а в цепь статора с номинальным напряжением 6 кВ устанавливается высоковольтный преобразователь частоты на IGBT-транзисторах. Последний фактор обуславливается тем, что преоб-

разователь частоты ухудшает качество питающего напряжения, что приводит к перегреву асинхронной машины и снижению ее загрузки для обеспечения бесперебойной работы.

Одним из перспективных направлений модернизации подъемных установок с асинхронными двигателями с фазным ротором является использование преобразователей частоты со стороны статора и ротора [2, 3]. При этом двигатель фактически переводится в режим машины двойного питания с возбуждением переменным током. Стоимость такой модернизации становится соизмеримой со стоимостью новой электромеханической системы, однако позволяет получить лучшие регулировочные характеристики, в особенности обеспечить постоянный момент на низких скоростях. Также преимуществом такой системы является то, что поскольку возбуждение двигателя осуществляется со стороны статора током низкого напряжения, то имеется возможность использовать не дорогостоящий высоковольтный транзисторный преобразователь частоты, а дешевый тиристорный непосредственный преобразователь частоты [4]. Схема такого вентильного двигателя (ВД) на основе АМ представлена на рис. 1.

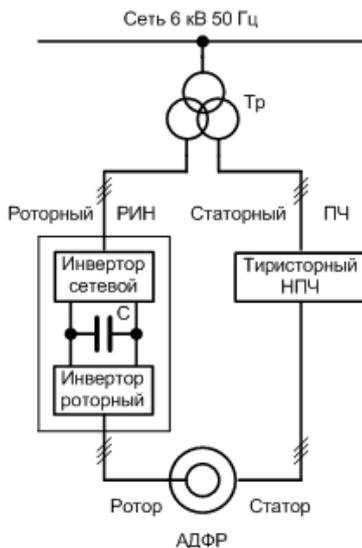


Рисунок 1 – Схема вентильного двигателя на основе асинхронной машины с фазным ротором

При этом тиристорный непосредственный преобразователь частоты в статоре АМ с фазным ротором должен регулировать частоту напряжения статора в диапазоне не более  $\pm 10$  Гц с реверсом порядка чередования фаз при переходе через нулевую частоту, что обеспечивает даже маловентильная восемнадцатитиристорная схема.

Важно отметить, что при такой модернизации необходимо оценить возможность ухудшения характеристик двигателя, возможность снижения производительности шахтной подъемной установки в

целом, поэтому целью данной работы является оценка изменения характеристик асинхронного двигателя с возбуждением переменным током.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Общий подход к анализу использования АМ в схеме ВД применительно к ВД с возбуждением постоянным током остается справедливым и для ВД с трехфазным возбуждением [5]. Согласно подходу, предложенному в [6], выделяются два основных фактора, ухудшающих использование АМ в схеме ВД по сравнению с классической схемой включения.

Во-первых, из-за большого сдвига фаз между ЭДС и током ротора, а также вследствие несинусоидальности тока электромагнитный момент, развиваемый АМ в схеме ВД, как правило, меньше номинального момента двигателя, т.е.

$$k_{I2} = M_{2VD} / M_{2ND} < 1, \quad (1)$$

где  $k_{I2}$  – коэффициент снижения момента в схеме ВД;  $M_{VD}$  – развиваемый момент в схеме с вентильным двигателем;  $M_{ND}$  – номинальный момент асинхронного электродвигателя.

Во-вторых, из-за различного сдвига фаз между намагничивающим током и током ротора при одном и том же значении тока ротора ток статора в схеме ВД, как правило, больше, чем в нормальной схеме включения. Наоборот, при одном и том же значении тока статора ток ротора  $I_{2VD}$  в схеме ВД меньше, чем ток ротора  $I_{2ND}$  в нормальной схеме включения, т.е.

$$k_{I1} = I_{2VD} / I_{2ND} < 1, \quad (2)$$

где  $k_{I1}$  – коэффициент снижения тока ротора.

Следовательно, для того, чтобы ток статора не превысил номинального значения, длительно допустимый ток ротора АМ в схеме ВД должен быть меньше номинального. Фактически коэффициент  $k_{I2}$  может быть назван коэффициентом использования меди ротора АМ, поскольку показывает, какую часть составляет момент АМ в схеме АД от момента, развиваемого при классической схеме включения, при одинаковых потерях в меди ротора (т.е. при одинаковом нагреве обмоток последнего).

Рассмотрим тот случай, когда ВД работает с постоянным углом опережения  $\beta = const$ . Момент асинхронной машины в режиме ВД в этом случае запишется:

$$M = \frac{3}{\omega_1} E_{2N} I_2 \cos \beta + \frac{\pi}{2\omega_1} x_{KN} I_2^2, \quad (3)$$

где  $\omega_1$  – частота вращения магнитного поля маши-

ны относительно статора;  $I_2$  – ток ротора;  $E_{2N}$  – номинальная фазная ЭДС ротора;  $\beta$  – угол опережения отпирания вентилей относительно коммутирующей ЭДС.

Далее запишем выражения соответственно для номинального и критического моментов АМ в нормальной схеме включения:

$$M_N = \frac{3}{\omega_1} E_{2N} I_{2N} \cos \varphi_{2N}; \quad (4)$$

$$M_K = \lambda_N M_N = 3E_{2N}^2 / (2\omega_{1N} x_{KN}), \quad (5)$$

где  $\cos \varphi_{2N}$  – номинальный коэффициент мощности в роторной цепи. Его величина может быть найдена по паспортным данным двигателя:

$$\cos \varphi_{2N} = \sqrt{\frac{\lambda_N + \sqrt{\lambda_N^2 - 1}}{2\lambda_N}}, \quad (6)$$

где  $\lambda_N$  – перегрузочная способность двигателя.

Исключая  $x_{KN}$  из (3) с помощью (4), (5), получаем выражение для номинального момента:

$$M_N = \frac{3E_{2N} I_2 \cos \beta}{\omega_1} + \frac{\pi I_2^2 E_{2N}}{4\omega_1 \lambda_N I_{2N} \cos \varphi_{2N}}. \quad (7)$$

Выражение для электромагнитного момента в относительных единицах запишется:

$$M^* = \frac{I_2^*}{\cos \varphi_{2N}} \cos \beta + \frac{\pi}{12\lambda_N} \left( \frac{I_2^*}{\cos \varphi_{2N}} \right)^2, \quad (8)$$

где  $\cos \varphi_{2N}$  – номинальный коэффициент мощности в роторной цепи;  $I_2^*$  – ток ротора в относительных единицах.

При переходе от коэффициента мощности к выражению, содержащему перегрузочную способность, получим:

$$M^* = I_2^* \frac{\cos \beta}{\cos \varphi_{2N}} + \frac{\pi}{6} I_2^* \left( \lambda_N - \sqrt{\lambda_N^2 - 1} \right). \quad (9)$$

При значениях  $\lambda_N > 1,7$ , имеющих место для используемых АМ с фазным ротором с большой точностью, выражение для относительного момента может быть переписано:

$$M^* = I_2^* \cos \beta + 0,25 I_2^* / \lambda_N. \quad (10)$$

Выражение для момента АМ в схеме ВД при номинальном токе ротора:

$$M^* = \cos \beta + 0,25 / \lambda_N. \quad (11)$$

Ток якоря ВД (ротора АМ) при номинальном электромагнитном моменте приближенно равен:

$$I_2^* = 2\lambda_N \left( \sqrt{\cos^2 \beta + 1/\lambda_N} - \cos \beta \right). \quad (12)$$

Из полученных выражений можно сделать вывод, что при управлении инвертором по закону  $\beta = const$  в целях получения приемлемой перегрузочной способности угол  $\beta$ , как правило, не может быть принят менее  $45^\circ$ . При этом, исходя из выражений для момента и тока ротора в относительных единицах, электромагнитный момент не превысит  $0,8 M_{ND}$ , а для того, чтобы ВД развил номинальный момент, ток ротора должен быть больше номинального не менее чем на 20 %.

В нормальной схеме включения АМ при  $I_2^* = 1$  также и  $M^* = 1$ , поэтому выражение для определения номинального момента при номинальном токе ротора совпадает с (7). Для определения коэффициента  $k_{I2}$  при произвольном токе, очевидно, следует в принятых относительных единицах записать выражение, аналогичное (12), для нормальной схемы включения АМ:

$$I_2^* = M^* \left( (\lambda_N + \sqrt{\lambda_N^2 - 1}) / (\lambda_N / M^* + \sqrt{(\lambda_N / M^*)^2 - 1}) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Учитывая, что  $\lambda_N + \sqrt{\lambda_N^2 - 1} = 2\lambda_N \cos^2 \varphi_{2N}$ , выражение (9) можно переписать в виде:

$$I_2^* = M^* \cos^2 \varphi_{2N} (2\lambda_N (\lambda_N / M^* + \sqrt{(\lambda_N / M^*)^2 - 1})^{\frac{1}{2}}). \quad (14)$$

Решая уравнение (14) относительно  $M^*$ , имеем:

$$M^* = \frac{I_2^*}{\cos \varphi_{2N}} \sqrt{1 - \left( \frac{I_2^*}{\cos \varphi_{2N}} \right)^2 / 4\lambda_N^2}, \quad (15)$$

или приближенно

$$M^* = I_2^* \sqrt{1 - I_2^{*2} / 4\lambda_N^2}. \quad (16)$$

Далее получаем выражение для определения коэффициента использования меди ротора АМ в схеме ВД:

$$k_{I2} = \frac{\cos \beta + \frac{\pi I_2^*}{12\lambda_N \cos \varphi_{2N}}}{\sqrt{1 - \left( \frac{I_2^*}{\cos \varphi_{2N}} \right)^2 / 4\lambda_N^2}}, \quad (17)$$

или приближенно

$$k_{I2} = \frac{\cos \beta + I_2^* \lambda_N}{\sqrt{1 - I_2^{*2} / 4\lambda_N^2}}. \quad (18)$$

Из (17), (18) видно, что величина коэффициента  $k_{I_2}$  зависит от тока ротора. Наименьшее значение  $k_{I_2}$  имеет место при  $I_2^* \rightarrow 0$  и равно  $\cos \beta$ . С ростом тока рассматриваемый коэффициент увеличивается. Это объясняется тем, что при увеличении тока сдвиг фаз в роторе АМ между ЭДС и током в схеме ВД уменьшается, а в нормальной схеме включения – увеличивается. Поэтому следует ожидать, что, начиная с некоторого значения  $I_2^*$ , коэффициент  $k_{I_2}$  превысит единицу, т.е. использование меди ротора в схеме ВД будет лучше, чем в нормальной схеме включения.

Приравняв (18) к единице и преобразуя полученное выражение, получаем уравнение

$$5I_2^{*2} + 8I_2^* \lambda_N \cos \beta - 16\lambda_N^2 \sin^2 \beta = 0. \quad (20)$$

Граничное значение тока при этом имеет вид:

$$I_{2Lim}^* = 0,8\lambda_N (\sqrt{5 - 4\cos^2 \beta} - \cos \beta). \quad (21)$$

Выражение (16) определяет теоретическое граничное значение тока, выше которого  $k_{I_2} > 1$ .

Выясним, не превышает ли  $I_{2Lim}^*$  по (21) предельный ток по условиям естественной коммутации инвертора:

$$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{\pi I_2^*}{6\lambda_N \cos \varphi_{2N}}. \quad (22)$$

Рассмотрим, в первую очередь, случай  $\beta \leq 60^\circ$ , когда теоретически предельное значение угла коммутации  $\gamma = \beta$ . Подставив это значение в (24), находим максимальное значение коммутируемого тока:

$$I_{2max}^* = \frac{6}{\pi} (1 - \cos \beta) \lambda_N \cos \varphi_{2N} \approx 2\lambda_N (1 - \cos \beta). \quad (23)$$

Определим, при каком условии

$$I_{2Lim}^* < I_{2max}^*, \quad (24)$$

т.е. существует область значений токов  $I_{2Lim}^* < I_2^* < I_{2max}^*$ , в которой использование меди ротора в схеме ВД лучше, чем в нормальной схеме включения. Для этого подставим (21) и (23) в (19) и преобразуем полученное выражение к виду

$$5\cos^2 \beta - 6\cos \beta + 1 > 0. \quad (25)$$

Решение неравенства (25) дает:  $\beta < 0$ ,  $\beta > \arccos 0,2 \approx 79^\circ$ . Следовательно, это неравенство при  $\beta < 60^\circ$  не выполняется.

Рассмотрим далее случай  $\beta > 60^\circ$ , когда теоретическому пределу коммутационной устойчивости инвертора соответствует  $\gamma = 60^\circ$ . Тогда вместо (23)

имеем:

$$I_{2max}^* = \frac{6}{\pi} (\cos(\beta - \pi/3) - \cos \beta) \lambda_N \cos \varphi_{2N} \approx \lambda_N (\sqrt{3} \sin \beta - \cos \beta). \quad (26)$$

Подстановка (26) и (21) в (24) и последующее преобразование полученного выражения приводит к неравенству

$$5\sqrt{3} \sin \beta - 4\sqrt{1 + 4\sin^2 \beta} > \cos \beta. \quad (27)$$

Если бы удалось найти значения  $\beta > 60^\circ$ , одновременно удовлетворяющие неравенству (27), это означало бы, что существует область значений токов, в которой использование меди ротора в схеме ВД лучше, чем в нормальной схеме включения. На самом деле, однако, неравенство (27) при  $0 < \beta < \pi/2$  не имеет решений, т.к. его правая часть положительна, а левая при любых значениях  $\beta$  отрицательна, т.е.

$$5\sqrt{3} \sin \beta - 4\sqrt{1 + 4\sin^2 \beta} < 0. \quad (28)$$

Действительно, последнее соотношение легко преобразуется к очевидному тождественному неравенству

$$\sin^2 \beta < 15/11. \quad (29)$$

Следовательно, использование меди ротора в схеме ВД при любых значениях  $\beta$  и во всем диапазоне нагрузок всегда хуже, чем в нормальной схеме включения.

Для нахождения тока статора ВД используем схему замещения асинхронной машины, пренебрегая активными сопротивлениями статора и ротора. Кроме того, будем полагать, что ток  $\dot{I}_2$  сдвинут относительно напряжения  $\dot{U}_1$  на угол  $\psi$ , т.е.

$$\dot{U}_1 = U_1; \dot{I}_2 = I_2 e^{j\psi}. \quad (30)$$

Тогда ток статора в комплексной форме равен

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U_1}{j(x_0 + x_1)} - I_2 \frac{jx_0}{j(x_0 + x_1)} e^{j\psi} = \\ &= -jI_{00} - \frac{I_2' (\cos \psi + j \sin \psi)}{c_1}, \end{aligned} \quad (31)$$

где  $I_{00} = U_1 / X_1$ ;  $I_{00}$  – ток идеального холостого хода ВД;  $c_1$  – коэффициент соотношения реактивного сопротивления статора и цепи намагничивания.

Определяя модуль комплекса  $\dot{I}_1$ , после преобразований получаем

$$I_1^2 = I_{00}^2 + 2I_{00}I_2' \sin \psi / c_1 + (I_2' / c_1)^2. \quad (32)$$

Тогда для угла  $\psi$  справедливо будет выражение

$$\sin \psi = \sqrt{\sin^2 \beta - \frac{\pi I_2 \cos \beta}{3I_{2cr}} - \left( \frac{\pi I_2}{6I_{2cr}} \right)^2}, \quad (33)$$

где  $I_{2cr}$  – предельный ток ротора асинхронной машины при классической схеме включения.

Для упрощения дальнейших выкладок и получения результата в аналитическом виде осуществим линеаризацию зависимости (23) путем разложения ее в ряд с сохранением двух первых членов ряда:

$$\sin \psi \approx \sin \beta - \frac{\pi I_2}{6I_{2cr}} \operatorname{ctg} \beta. \quad (34)$$

На практике ошибка определения  $\sin \psi$  по выражению (24) не превышает 5%, а погрешность, вносимая в конечный результат (величину коэффициента  $k_{I1}$ ), значительно меньше.

Ток статора в этом случае определится по выражению

$$I_1^2 = I_{oo}^2 + 2I_{oo}I_2' \sin \beta / c_1 + (I_2' / c_1)^2 \left( 1 - \frac{\pi}{3} \chi c_1 \operatorname{ctg} \beta \right), \quad (35)$$

где  $\chi$  – коэффициент соотношения тока холостого хода и приведенного предельного тока ротора, которое на практике для двигателей средней и большой мощности составляет 0,05–0,1.

Векторные диаграммы токов асинхронной машины в схеме вентильного двигателя и в нормальной схеме включения аналогичны, т.е. ток статора при номинальной нагрузке определится по выражению

$$I_{1N}^2 = I_{oN}^2 + 2I_{oN}I_{2N}' \sin \varphi_{2N} / c_1 + (I_{2N}' / c_1)^2. \quad (36)$$

Очевидно, что токи, определяемые выражениями (35) и (36) с точностью до постоянного множителя, определяют потери в статоре АМ, соответственно, в номинальном режиме классической схемы включения и в схеме ВД. Определим коэффициент  $k_{I1}$  при номинальном токе статора. Принимая, что  $I_2 = k_{I1}I_{2N}$ ;  $c_1 \approx 1$ ;  $I_{oo} = I_{oN}$ , получим

$$k_{I1} = \left( 1 - \frac{\pi}{3} \chi \operatorname{ctg} \beta \right)^{-1} \left\{ \left[ I_o^{*2} \cos^2 \beta + (2I_o^* \sin \varphi_{2N} + 1) \left( 1 - \frac{\pi}{3} \chi \operatorname{ctg} \beta \right) \right]^{\frac{1}{2}} - I_o^* \sin \beta \right\}. \quad (37)$$

Выражение (37) позволяет оценить, на сколько следует уменьшить ток ротора АМ в схеме ВД по сравнению с номинальным, чтобы ток статора был равен своему номинальному значению. Значения параметров  $\chi$ ,  $I_o^*$  и  $\sin \varphi_{2N}$ , входящие в (37), могут быть найдены по паспортным или каталожным данным двигателя:

$$\sin \varphi_{2N} = \sqrt{\frac{\lambda_N - \sqrt{\lambda_N^2 - 1}}{2\lambda_N}}; \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \chi &= 0,5 \sin 2\varphi_{2N} (\operatorname{tg} \varphi_N - \operatorname{tg} \varphi_{2N}) = \\ &= 0,5 (\operatorname{tg} \varphi_N - \lambda_N + \sqrt{\lambda_N^2 - 1} / \lambda_N); \end{aligned} \quad (39)$$

$$I_o^* = \sin \varphi_N + (\lambda_N - \sqrt{\lambda_N^2 - 1}) \cos \varphi_N, \quad (40)$$

где  $\varphi_N$  – номинальный угол сдвига фаз между током и напряжением статора АМ в нормальной схеме включения.

Для АМ средних и больших мощностей видно, что величина  $k_{I1}$  изменяется в пределах 0,75–0,9, причем лучшее использование в схеме ВД имеет место у двигателей с большими значениями  $\chi$  и меньшими значениями перегрузочной способности  $\lambda_N$  и относительного значения тока холостого хода  $I_o^*$ .

При управлении инвертором ВД по закону  $\delta = \operatorname{const}$  целесообразно выразить коэффициент  $k_{I1}$  через угол  $\delta$ , а не  $\beta$ . Для этого запишем:

$$\begin{aligned} \sin \psi &= \sqrt{1 - \left( \cos \delta + \frac{\pi x_p I_2}{6E_{20}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\sin^2 \delta - \frac{\pi I_2 \cos \delta}{6I_{2cr}} - \left( \frac{\pi I_2}{6I_{2cr}} \right)^2}. \end{aligned} \quad (41)$$

Нелинейная зависимость (41) может быть аппроксимирована выражением

$$\sin \psi = \sin \delta + \left. \frac{d \sin \psi}{d I_2} \right|_{I_2=0} = \sin \delta + \frac{\pi I_2 \operatorname{ctg} \delta}{6I_{cr}}. \quad (42)$$

Однако расчет показывает, что при значениях  $\delta$ , близких к 0, (42) дает значительную погрешность, а при  $\delta = 0$  такая аппроксимация вообще лишена смысла, поскольку соответствующая производная в (42) обращается в бесконечность. Поэтому поступим иначе: учитывая, что искомое значение  $k_{I1}$  достаточно близко к единице, будем полагать

$$\sin \psi = \sin \psi_N = \operatorname{const}, \quad (43)$$

где  $\psi_N$  – значение угла  $\psi$  при  $I_2 = I_{2N}$ . Согласно (41), получим

$$\begin{aligned} \sin \psi_N &= (\sin^2 \delta + (\pi \chi / 3) \cos \delta - \\ &- (\pi \chi / 6)^2)^{\frac{1}{2}} \approx \sqrt{\sin^2 \delta + (\pi \chi / 3) \cos \delta}. \end{aligned} \quad (44)$$

Приближенное равенство в (39) возможно вследствие того, что для серийных АМ  $\chi \ll 1$ . При  $\delta = 0$  соотношение (44) еще больше упрощается:

$$\sin \psi_N \approx \sqrt{\pi \chi / 3} \approx \sqrt{\chi}. \quad (45)$$

С учетом сказанного, для определения  $k_{I1}$  получаем уравнение

$$k_{I1}^2 + 2k_{I1}I_0^* \sin \psi_N - (2I_0^* \sin \psi_N + 1) = 0, \quad (46)$$

решение которого имеет вид:

$$k_{I1} = \sqrt{I_0^{*2} \sin^2 \psi_N + 2I_0^* \sin \psi_N + 1} - I_0^* \sin \psi_N, \quad (47)$$

причем  $\sin \psi_N$  определяется по (44). В предельном случае  $\delta = 0$  выражение (47) можно записать как

$$k_{I1} = \sqrt{I_0^{*2} \chi + 2I_0^* \sin \varphi_{2N} + 1} - I_0^* \sqrt{\chi}. \quad (48)$$

Также при рассмотрении вопроса модернизации необходимо проанализировать критерии применимости схемы ВД.

Такая схема может быть применена при модернизации действующей подъемной установки, если при переходе в режим ВД обмотки статора и ротора не будут перегреваться. При этом можно считать, что последнее условие будет выполнено, если средние за цикл потери в обмотках АМ не превысят номинального значения. В свою очередь, средние потери целесообразно оценивать с помощью эквивалентного (среднеквадратичного) тока, который не должен превышать номинального значения.

Ранее было получено, что  $k_{I1} < 1$ . Из этого, в частности, следует, что эквивалентный ток статора ВД  $I_{IE}$  не превышает номинальный ток АМ в классической схеме включения, т.е. эквивалентный ток ротора будет заведомо меньше номинального. Следовательно, чтобы сделать вывод о приемлемости схемы ВД, следует определить  $I_{IE}$ . Для этого, в свою очередь, необходимо на основе диаграммы моментов подъемного двигателя рассчитать диаграмму токов АМ в схеме ВД.

Сначала рассчитывается диаграмма токов ротора. Далее, исходя из найденных значений токов  $I_2$ , на всех участках тахограммы определяются токи  $I_1$  по выражению (17) (при работе инвертора при  $\beta = const$ ). После расчета токов статора определяется эквивалентный ток  $I_{IE}$  и сравнивается с номинальным током двигателя [1]. Если  $I_{IE} < I_{IN}$ , то применение схемы ВД с принятым законом управления инвертором допустимо. Если  $I_{IE} > I_{IN}$ , то рекомендуется заменить закон управления инвертором, в частности, уменьшить угол  $\beta$  при обеспечении заданной перегрузочной способности. Если эквивалентный ток статора вновь превысит номинальный, то установленный двигатель имеет недостаточный запас по мощности и применение схемы ВД невозможно.

Описанная методика позволяет получить достаточно строгий критерий приемлемости схемы ВД, однако при этом требует большого объема вычислений. Для приближенной оценки возможности использования этой схемы целесообразно воспользоваться упрощенной методикой. Она основана на допущении о том, что и в схеме ВД и в нормальной схеме включения привод на протяжении всего цикла работает в двигательном режиме (реально в нормальной схеме включения основное замедление может происходить в режиме динамического торможения АМ или свободного выбега) и, кроме того, коэффициенты  $k_{I1}$ ,  $k_{I2}$  постоянны и не зависят от величины тока.

Чтобы воспользоваться приближенной методикой, необходимо для данной подъемной установки определить коэффициент фактического запаса по мощности установленного двигателя  $k_F = M_D / M_N = P_D / P_N$ , который показывает, какую часть от номинального момента (мощности) АМ составляет фактическое значение среднеквадратичного за цикл момента  $M_D$  (мощности  $P_D$ ). Затем, в зависимости от принятого закона управления инвертором, следует рассчитать значение коэффициента  $k_{I1}$ , определив тем самым, на сколько следует уменьшить длительно допустимый ток ротора по сравнению с номинальным. Дальнейший расчет можно провести двумя способами. Первый способ сводится к тому, что, положив  $I_2^* = k_{I1}$ , следует найти коэффициент  $k_{I2}$ , который и будет в данном случае искомым коэффициентом  $k_I$  использования АМ в схеме ВД. Второй способ заключается в том, что коэффициент  $k_{I2}$  рассчитывается при номинальном токе ротора по выражению (13), а в качестве  $k_I$  принимается произведение  $k_I = k_{I1}k_{I2}$ .

Найденное одним из способов значение  $k_I$  сравнивается с  $k_F$ . Если  $k_I \geq k_F$ , то имеет место достаточный запас по мощности двигателя и использование схемы ВД возможно.

**ВЫВОДЫ.** В работе произведена оценка снижения электромагнитного момента асинхронного электродвигателя при возбуждении переменным током. При этом установлено, что при использовании двух преобразователей частоты в обмотках статора и ротора на 20 % снижается перегрузочная способность машины. Приведенные зависимости для расчета токов ротора и статора, а также описанная методика оценки возможности использования подключения АМ по схеме ВД с возбуждением переменным током может быть использована при анализе возможности модернизации электроприводов шахтных подъемных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.

2. Гуляев И.В. Перспективные направления исследований обобщенной электромеханической системы на базе асинхронизированного вентильного двигателя // XXVII Огаревские чтения: материалы научной конф.: в 5 част. – Часть 5. – Саранск, 1998. – С. 28–29.

3. Иванцов В.В. Электропривод «Эратон» – эффективный инструмент модернизации шахтных подъемных машин. – Режим доступа: <http://erasib.ru/articles/hoist-eratonfr-reversor>

4. Иванцов В.В. Машина двойного питания в электроприводе шахтных подъемных установок. – Режим доступа: <http://erasib.ru/articles/hoist-MDP-fr-NPCh>

5. Чермалых В.М., Бардавил И. Электромеханические характеристики электропривода по схеме вентильного двигателя с возбуждением переменным током // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 28–31.

6. Чермалых В.М., Баринберг В.А. Перегрузочная способность асинхронной машины с фазным ротором в схеме вентильного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. – № 4. – С. 34–40.

ANALYSIS OF RATED POWER DECREASING FOR ASYNCHRONOUS MOTOR WITH ROTOR AC EXCITATION

V. Chermalyh, L. Toropova, A. Toropov, A. Bychkovskiy

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”  
prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: liliaya@ukr.net

The paper is one of the main ways to modernize mine hoist installations based electric wound rotor induction motors. Also, the basic wiring diagram of converters for speed control of induction motors, the advantages and disadvantages of their application are considered. Wiring diagram of the wound rotor induction motor with a double-fed machine scheme is proposed. Frequency converters are included in the circuit of the stator and the rotor circuits, while for the formation of the excitation field cheaper thyristor frequency converter is used. Further analyse of reducing of the nominal capacity of the asynchronous machine with AC excitation is made. The reasons of reducing electromagnetic torque machines, as well as the feasibility of using frequency converters from the stator and rotor are considered. The analytic dependence of the electromagnetic torque and rotor current double-fed machines are concluded. Expression obtained as a function of the overload capacity of the motors, as well as the timing advance function are obtained. Percentage ratio of incidence of the motor at the rated current of the rotor as well as increasing the current while providing nominal load are calculated. The recommendations for the using of the proposed drive system when upgrading electric mine hoist installations are made.

**Key words:** valve drive, rated power, excitation, double-fed machine, analysis.

REFERENCES

1. Chilikin, M.G. and Sandler, A.S. (1981), *Obshhiy kurs elektroprivoda* [General Course of electric drive], Energoizdat, Moscow. (in Russian)

2. Gulyaev, I.V. (1998), *Perspektivnye napravleniya issledovaniy obobshhennoy elektromekhanicheskoy sistemy na baze asinhronizirovannogo ventilnogo dvigatelya* [Perspective research generalized electromechanical system based on asynchronized valve drive], XXVII Ogarevsky reading: Materials Science Conf.: in 5 parts, part 5, Saransk, 1998, pp. 28–29. (in Russian)

3. Ivantsov, V.V. *Elektroprivod «Eraton» – effektivniy instrument modernizatsii shahtnykh podyomnykh mashin* [“Eraton” drive is an effective tool for modernization of mine hoists], available at: <http://erasib.ru/articles/hoist-eratonfr-reversor>. (in Russian)

4. Ivantsov, V.V. *Mashina dvoynogo pitaniya v elektroprivode shahtnykh podyomnykh ustanovok* [Machine double supply to the drive shaft hoisting installations], available at: <http://erasib.ru/articles/hoist-mdp-fr-npch> (in Russian)

5. Chermalyh, V.M. and Bardavil, I. (1998), “Electromechanical characteristics of the electric scheme valve engine with AC excitation“, *Tekhnicheskaya elektrodinamika*, Vol. 5, pp. 28–31. (in Russian)

6. Chermalyh, V.M. and Barinberg, V.A. (1985), “Overload capacity of the asynchronous machine with wound rotor in the scheme of valve drive“, *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, Vol. 4, pp. 34–40. (in Russian)

Стаття надійшла 18.05.2014.