

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ШАХТНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Дудник М.З.

Донецкий государственный технический университет

Чувашев В.А., Чувашев И.В.

Украинский НИИ взрывозащищенного электрооборудования (УкрНИИВЭ)

R504A@FCITA.DN.UA

*Requirements to flameproof short-circuit asynchronous motors (AM) as the fundamentals of electric drives of clearing combines, machines and mechanisms of a coal industry steadily increase. The special importance is acquired by magnifying of power, overload capacity, power parameters of coal miner, plough and conveyor AM, decrease of their specific consumption of materials and labour inputs, increase of use reliability etc. One of the ways solving of the listed problems is use cast copper windings of a curl executed on original technology from waste of productions (of a copper breakage) instead of aluminium.*

Увеличение вращающих моментов (мощности) асинхронных двигателей (АД) с высоким насыщением магнитной цепи возможно путем уменьшения индуктивного сопротивления ротора обмотки. Это достигается применением роторов с глубоким пазом и литой медной клеткой, поскольку начальный пусковой и критический вращающие моменты зависят от приведенного начального пускового индуктивного сопротивления двигателя. Реализация этих предложений кроме увеличения моментов способствует уменьшению или устранению провалов («седла») в механической характеристике АД при сохранении или снижении номинальных скольжений и увеличении номинальной мощности [1].

Лабораторными исследованиями установлено, что некоторые сочетания стержней и пазов позволяют увеличить мощность, перегрузочную способность, КПД,  $\cos\phi$  АД. Расчетным путем доказана возможность улучшения механических характеристик в результате применения глубоких пазов при относительно небольшой высоте стержней роторных обмоток. Макетные образцы АД с литой медной клеткой ротора, изготовленные по специальной технологии были испытаны с тремя типами роторов с раскрытием паза и без него. На основании экспериментального подтверждения возможности значительного улучшения характеристик АД выбраны и обследованы его рациональные параметры.

Характеристики асинхронных двигателей устанавливаются, исходя из активных сопротивлений их обмоток при так называемой расчетной рабочей температуре согласно ГОСТ 183—74, т.е. в нагретом состоянии. При этом температура изоляции обмоток классов нагревостойкости F и H принимается 115 °С (независимо от температуры окружающей среды, степени загрузки двигателя и интенсивности его охлаждения), т.е. соответствует среднестатистической температуре обмоток двигателей общего назначения со средним уровнем использования активных частей - двигателей с воздушным охлаждением и необдуваемых. При разработке этих двигателей отсутствуют жесткие ограничения предельно допустимых габаритных размеров. Неучет взаимовлияния температуры, активных сопротивлений и потерь энергии в обмотках, а также технических характеристик приводит к погрешностям в расчетах двигателей с интенсивными способами охлаждения и ограниченными габаритами, например, с водяным охлаждением статора, применяемых в электроприводах угольных комбайнов и стругов. При этом затрудняется объективная оценка весомости некоторых факторов, улучшающих технические характеристики роторов, один из которых - замена литой алюминиевой обмотки ротора литой медной.

Объективная оценка ожидаемого уровня допустимых полезных значений мощности и характеристик вновь разрабатываемых и модернизируемых двигателей возможна только с учетом взаимовлияния расчетных характеристик и нагрева обмоток. В первых попытках определения допустимой полезной мощности комбайновых и струговых двигателей в режимах частых пусков не учитывалось влияние фактической и расчетной рабочих (ГОСТ 183-74) температур обмотки ротора [1, 2]. Чтобы оценить ожидаемый перегрев обмотки статора нового двигателя  $\Theta_{1n}$ , необходимо знать опытное значение перегрева базового двигателя  $\Theta_{16}$  и расчетные значения эквивалентных греющих потерь каждого из них ( $P_{\Sigma 1n}$  и  $P_{\Sigma 26}$ ), т.е.  $\Theta_{1n} = \Theta_{16} P_{\Sigma 1n} / P_{\Sigma 26}$ , если габариты и способ охлаждения одинаковы. Эквивалентные греющие потери  $P_{\Sigma 1}$  обмотки статора определяют по формулам, приведенным в статьях [2, 3].

Коэффициент  $K_D$  повышения динамических потерь при пусках под нагрузкой по сравнению с пусками на холостом ходу в соответствии со статьей [3]  $K_D = M_D / (M_D - M_C)$ , где  $M_D$  и  $M_C$  — средние (за цикл) значения вращающих моментов двигателя и сопротивления нагрузки. Если принять  $M_D \approx 0,5(M_n - M_{max})$  и  $M_C = 0,5M_n$  (что допускается для узкозахватных комбайнов, так как их исполнительные органы практически не могут быть защемлены в пласте, и для угольных стругов, поскольку натяжение тяговой цепи, соединенной с исполнительным органом, завершается, как правило, к окончанию разгона), то

$$K_{\partial} = \frac{K_n + K_{max}}{K_n + K_{max} - 1} \quad (1)$$

где  $K_n = M_n/M_n$  и  $K_{max} = M_{max}/M_n$  - кратность пускового и максимального моментов.

Разумеется, такие параметры, как  $R_1=r_1$  и  $r_2=[0,5r_2^1+r_2^1]$ , а также  $P_{m1}$ ,  $P_{m2}$ ,  $P_{s2}$ ,  $P_{\partial}$ , и  $S_n$  определялись при расчетной рабочей температуре обмоток статора и ротора по ГОСТ 183—74, т.е. при  $t_1 = t_2$  и температуре  $115^{\circ}\text{C}$ , без учета взаимовлияния нагрева обмоток и характеристик двигателя. Здесь  $r_2^1$  и  $r_2^1$  — активные сопротивления обмотки ротора в рабочем и пусковом режимах;  $P_{m1}$ ,  $P_{m2}$ ,  $P_{s2}$  — потери меди обмоток статора, ротора и эквивалентные греющие потери в рабочем режиме ротора;  $P_{\partial}$  — средние за цикл динамические потери или потери на разгон механизма.

Принятые предпосылки и решения [2,3] справедливы в случае малых значений продолжительности включения (ПВ < 25%), но приводят к погрешностям при ПВ = 40%, а также при ПВ > 60%, что характерно для комбайновых и струговых двигателей. Погрешности в предварительной оценке характеристик двигателя на основании данных статьи [4] и неточности в расчетах [1, 2, 51, где в тепловой схеме замещения использовались в качестве исходных данных потери при температуре обмоток  $t_1 = t_2$  при  $115^{\circ}\text{C}$ , все больше увеличиваются в насыщенных двигателях, имеющих габаритные ограничения, в том числе по высоте. Например, расчеты двигателей с литой медной обмоткой ротора показали рост его полезной мощности не более чем на 10 %, что ниже фактически достигнутых результатов. Поэтому в дополнение к известным расчетам [1,2] предлагается учитывать взаимовлияние превышения температуры и сопротивления обмоток по ГОСТ 11828—86:

$$\Theta_{Cu} = \frac{r_2 - r_x}{r_x} (235 + t_x - t_0) \quad (2)$$

$$\Theta_{Al} = \frac{r_2 - r_x}{r_x} (245 + t_x - t_0) \quad (3)$$

где  $r_2$  и  $r_x$  — значения активных сопротивлений обмоток в горячем и холодном состояниях;  $t_x = 20^{\circ}\text{C}$  - стандартная температура обмотки, при которой удельная электропроводность литой меди  $j = 57 \text{ См}$ , а алюминия  $29 \text{ См}$ ;  $t_0$  — температура охлаждающего вещества,  $^{\circ}\text{C}$ .

В комбайновых и струговых двигателях с водяным охлаждением станины температура воды на входе в двигатель согласно ОСТ 160.510.061—84 принимается  $25^{\circ}\text{C}$ , следовательно, в случае использования медной обмотки

$$r_x = r_{255/360} \quad ,$$

$$r_2 = r_{Cu}(260 + \Theta_1)/255 = r(260 + \Theta_2)/360 \quad ,$$

$$R_1 = r_1(260 + \Theta_1)/360 \quad ,$$

$$R_2 = \frac{(260 + \Theta_2)}{360} \cdot \frac{(r_2^1 + r_{2n}^1)}{2} = \frac{(260 + \Theta_2)}{720} \cdot (r_2^1 + r_{2n}^1) \quad , \quad (4)$$

и алюминиевой

$$R_2 = \frac{(270 + \Theta_2)}{370} \cdot \frac{(r_2^1 + r_{2n}^1)}{2} = \frac{(270 + \Theta_2)}{740} \cdot (r_2^1 + r_{2n}^1) \quad , \quad (5)$$

где  $r^1$ ,  $r_2^1$  и  $r_{2n}^1$  — активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления ротора при  $t = 115^{\circ}\text{C}$ ;  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  — ожидаемые перегревы обмоток статора и ротора при  $t = 25^{\circ}\text{C}$ .

Аналогично оценивается влияние температуры на номинальное скольжение  $S_{nCu}$  и потери  $P_{m2Cu}$  в медных обмотках ротора

$$S_{nCu} = S_n \cdot (260 + \Theta_2)/360 \quad ,$$

$$P_{m2Cu} = P_{m2} \cdot (260 + \Theta_2)/360 \quad , \quad (6)$$

и в алюминиевых

$$S_{nAl} = S_n \cdot (270 + \Theta_2)/370 \quad ,$$

$$P_{m2Al} = P_{m2} \cdot (270 + \Theta_2)/370 \quad , \quad (7)$$

Если обмотка статора медная  $P_{m1Cu} = P_{m1}(260 + \Theta_1)/370$ , то уточняются значения  $n$ ,  $P_{s1}$ ,  $P_{s2}$ ,  $P_{\partial}$ . При расчетах  $P_{s16}$ ,  $P_{s26}$  значение  $\Theta_{16}$  принимается по результатам испытаний базового образца. С учетом опыта

разработки и исследований комбайновых двигателей с водяным охлаждением статора [6] можно принять  $\Theta_{26} = 2\Theta_{16}$ . Для вновь разрабатываемых двигателей расчет ведется методом итераций, т. е., задавшись предварительными значениями  $\Theta'_{1n}$ ,  $\Theta'_{2n}$ , определяем  $P'_{з1n}$  и  $P'_{з26}$ , проверяем, насколько  $\Theta'_{1n}$  и  $\Theta'_{2n}$  отличаются от предварительно принятых. В случае заметной разницы корректируем расчеты  $P''_{з1n}$ ,  $P''_{з26}$ ,  $\Theta''_{1n}$  и  $\Theta''_{2n}$ , пока не достигнем достаточно малого (1—2 °С) расхождения между предыдущими и последующими значениями превышений температур обмоток.

Предложенная методика не учитывает влияния температур обмотки ротора на вытеснение пускового тока (индуктивное сопротивление при пуске), падения напряжения на зажимах двигателя при пуске в условиях шахтной сети на уровень  $M_n, M_{max}, K_d, P_d$ , а также качества изготовления системы водяного охлаждения, пропитки обмотки статора и среднего зазора между корпусом и пакетом статора (разброса тепловых сопротивлений). Это не принято во внимание в целях упрощения расчетов и будет учтено при дальнейшем совершенствовании методики с использованием ЭВМ. Новая методика позволяет точнее выполнять расчеты, оценить эффективность замены литой алюминиевой обмотки медной. Такая замена дает возможность повысить мощность комбайновых двигателей более чем на 25—35 %, кроме того, выявить увеличение перегрузочной способности двигателя. Если по ранее существующим методикам [7] момент  $M_{max}$  считается не зависящим от температуры обмоток

$$M_{max} = \frac{14,36U_{\phi}^2}{n_c(r_l + \sqrt{r_l^2 + x_{кр}^2})}, \quad (8)$$

и замена алюминия медью влечет изменение критического скольжения, то по предлагаемой методике  $M_{max}$  в значительной мере определяется температурой обмотки статора:

$$M_{max} = \frac{14,36U_{\phi}^2}{n_c[r_l \frac{260+\Theta_1}{360} + \sqrt{r_l^2 (\frac{260+\Theta_1}{360}) + x_{кр}^2}]}, \quad (9)$$

где  $n_c$  - синхронная частота вращения;  $x_{кр}$  - индуктивное сопротивление короткого замыкания в рабочем режиме;  $U_{\phi}$  - фазное напряжение двигателя.

При одинаковых значениях мощности, суммарного сечения стержней ротора, при одних и тех же габаритах, режимах работы и системах охлаждения замена алюминиевой обмотки ротора медной уменьшит  $P_{м1}$ ,  $P_{м2}, P_{з1}, P_{з2}, \Theta_2$ , а также  $x_{кр}$  (за счет увеличения удельной электропроводности и коэффициента вытеснения пускового тока в результате уменьшения  $\Theta_2$ ), т. е. в конечном счете повысит  $M_{max}$ .

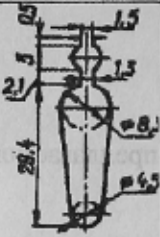

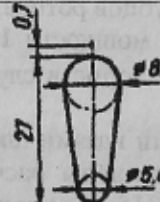

Чтобы оценить точность предлагаемой методики, рассчитаны следующие варианты конструкции ротора двигателей ЭКВ габарита 4, по которым имеются материалы испытаний: ЭКВ4—160—3 с двух-клеточной алюминиевой обмоткой ротора (принят в качестве базового); ЭКВ4—160—2М с глубокопазной медной обмоткой ротора и ЭКВ4—160—2М—1 как его вариант, но с алюминиевой обмоткой. Поскольку при изготовлении ЭКВ4—160—2М опыта заливки медью столь крупных роторов практически не было, во избежание брака было решено расширить нижние, находящиеся ближе к валу, части пазов, сузив в этом месте зубцы, доведя магнитную индукцию до 2,3 Тл. Несмотря на неравновеликость зубцов ротора, заниженный  $\cos\phi$ , невозможность повышения магнитного потока (по сравнению с принятым при мощности 160 кВт), достигнут рост мощности ЭКВ4—160—2М до 269 кВт при  $\theta = 145^\circ\text{C}$ , что соответствует норме в случае использования изоляции класса нагревостойкости Н [8].

Усовершенствованная технология позволяет заливать роторы с овальными пазами шириной более 5 мм, что обеспечит возможность изготовления равновеликих зубцов ротора. Выполнены расчеты и изготовлен штамп для вырубки листов ротора двигателя (условно обозначенного ЭКВ4—315) с равновеликими зубцами. Ожидается, несмотря на уменьшение сечения стержней ротора по сравнению с сечением в ЭКВ4—160—2М, дальнейшее повышение номинальной мощности в результате увеличения магнитного потока примерно на 14 %, что невозможно в ЭКВ4—160—2М. Увеличение магнитного потока, начального пускового тока  $I_n$  до 1260 А при номинальном напряжении  $U_n = 1140$  В на зажимах двигателя и до 2000 А при  $U = 660$  В не нарушит работоспособность очистного комплекса, так как с учетом падения напряжения в шахтной сети напряжение на зажимах двигателя в момент пуска снизится до 70—80 % номинального и пусковые токи до 700—800 А при  $U_n = 1140$  В и до 1100—1400 А при  $U_n = 660$  В, т. е. не превысят уставку реле максимальной защиты, которая составляет 600 % номинального тока пускателя, работающего в режиме АСЗ по ГОСТ 11206—77 без "опрокидывания" двигателя и длительного пребывания включенного пускателя под током. Режим АСЗ пускателя обеспечивается за счет того, что исполнительные органы узкозахватного комбайна практически не могут быть заземлены в массиве пласта. Это облегчает условия пуска и позволяет повысить предельные значения его  $I_n$  и уставку реле максимальной защиты пускателя [9].

Двигатели ЭКВ4—160—2М рассчитаны как для комбайнов, так и для стругов, остальные же используются только в комбайнах (табл. 1). В случае неучета этого взаимовлияния замена алюминиевой

обмотки медной позволяет в режиме работы комбайна повысить мощность двигателя всего на 5—7% (с 210 до 220 кВт, если используется изоляция класса F, и с 245 до 260 кВт — при изоляции класса H), а при учете возможен рост номинальной мощности примерно на 23—25%. Применение равновеликих зубцов ротора и увеличение магнитного потока повышают допустимую мощность еще не менее чем на 8—10%.

Таблица 1

Техническая характеристика без учета/ с учетом взаимовлияния нагрева обмоток												
Двигатель	Размеры паза ротора, мм	Материал короткозамкнутой клетки	Мощность $P_2$ , кВт	КПД, %	$\cos\varphi$	Пусковой ток $I_n$ , А	Вращающий момент, Н*м		Эквивалентные греющие потери $P$ , Вт		Перегрев $\theta$ , °С	
							$M_{п}$	$M_{max}$	$P_{\Sigma 1}$	$P_{\Sigma 2}$	$\theta_1$	$\theta_2$
ЭКВ-160-3		Напряжение 660 В										
		Al	160	91,98	0,7935	1066	2240	3136	7410	2405	90	-
			-	-	-	-	-	7625	2867	-	180	
			Напряжение 1140 В									
ЭКВ4-160-2М		Cu	160	93,3	0,7906	972	2583	4073	6804	1380	83	-
			-	-	-	-	-	-	6658	1354	79	85
			220	93,2	0,864	972	2583	4073	9562	2249	116	-
			220	-	-	-	-	-	10041	2573	119	162
			260	92,9	0,893	972	2583	4073	11792	2979	143	-
			250	-	-	-	-	-	12539	3678	145	231
			160*	93,2	0,7906	972	2583	4073	13719	3732	167	-
			-	-	-	-	-	14252	4410	168	277	
			145*	93,2	0,7629	972	2583	4073	12127	3432	145	-
			-	-	-	-	-	12818	3949	151	248	
ЭКВ4-160-2М-1	То же	Al	160	92,5	0,797	833	2473	4073	7054	2196	68	-
			-	-	-	-	-	4090	7131	2505	87	157
	210***		92,1	0,8581	833	2473	4073	9768	3520	119	-	
	198		92,2	0,8448	-	-	-	10450	4760	120	298	
			245	91,8	0,8851	833	2473	12033	4658	146	-	
		204	-	-	-	4073	10848	5179	128	325		
ЭКВ4-315		Cu	275	93,2	0,85	1260	3340	5600	11012	2740	134	-
			275	-	-	-	-	-	12380	3770	145	235
			250***	93,2	0,91	933	2450	4210	10402	4300	126	-
			250	-	-	-	-	12377	4461	145	280	

- Примечания: 1. Число включений в час  $Z=20$  и  $PВ=60\%$  в варианте, отмеченном одной звездочкой;  $Z=160$  и  $PВ=60\%$ .  
 2. Принято отношение числа пазов статор/ротор  $Z1/Z2=48/38$ ,  $Z1/Z2=48/42$  и магнитный поток повышен на 15%.  
 3. В варианте, отмеченном тремя звездочками, магнитный поток обеспечен таким, как у двигателя ЭКВ4-160 - 2М.

Кроме того, учет взаимовлияния нагрева обмоток и характеристик двигателя позволяет выявить такой фактор, ограничивающий возможности традиционных серийных двигателей, как температура обмотки ротора. Учитывая неравномерность ее нагрева и способность алюминия рекристаллизоваться при 300—400°С, следует принимать допустимое значение  $t_2 < 300^\circ\text{C}$ , т. е.  $\theta_2 < 275^\circ\text{C}$  при водяном охлаждении статора. В двигателях

ЭКВ4 это обстоятельство практически не позволяет использовать возможности изоляции класса нагревостойкости Н для повышения мощности, тогда как при медной обмотке ротора допустимая мощность определяется ограничением нагрева обмотки статора.

Таким образом, замена алюминиевой обмотки ротора медной повысит допустимую мощность двигателей ЭКВ4 на 35—37 % (т. е. со 190 до 269 кВт) в случае неизменного магнитного потока и на 50% (т. е. со 190 до 275 кВт) при одновременном его росте. Если увеличение мощности не требуется, то можно уменьшить габариты и материалоемкость двигателя. Повышение  $M_{max}$  двигателя с медной обмоткой ротора с теми же размерами, что и у двигателя с алюминиевой обмоткой, составило примерно 1 % (табл. 1).

Однако с учетом различия значений температуры обмоток в реальных эксплуатационных режимах увеличение  $M_{max}$  следует оценивать в пределах 3—5 %, что способствует повышению устойчивости работы очистного комплекса.

В процессе разработки и исследования двигателей ЭКВ с литой медной обмоткой ротора изготовлены и испытаны образцы ЭКВ3,5; ЭКВ4 и ЭКВ5 с  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ . Испытания в режиме S4 при номинальном напряжении на зажимах (табл. 2), а также данные о конструкции ротора и технические характеристики без и с учетом взаимовлияния нагрева обмоток (табл. 1) свидетельствуют, что предложенная методика дает несколько заниженные результаты в связи с расхождением значений тепловых сопротивлений базового и новых двигателей. Экспериментальные исследования показывают, что положительный эффект от замены алюминиевой обмотки ротора медной более весомый, чем по расчетам статей [1, 2].

Таблица 2

Двигатель	Материал обмотки	Продолжительность включения ПВ, %	Коэффициент инерции $F_j$	Число пусков в час $z$	Мощность $P_2$ , кВт	КПД, %	$\cos \phi$	Номинальное скольжение $S$ , %	Пусковой ток $I$ , А	Вращающий момент $M$ , Н*м			Перегрев по методу сопротивления $\theta$ , °С	
										$M_n$	$M_{min}$	$M_{max}$		
ЭКВ3,5—75	Al	40	1,2	25	75,0	82,90	0,830	7,10	312	710	650	865	116	
					79,3	80,63	0,826	8,54	312	710	650	865	145	
ЭКВ3,5—90	Cu	60	1,2	30	90,0	87,80	0,860	4,48	505	808	880	1 440	106	
					101,1	85,70	0,870	5,51	505	808	880	1 440	145	
ЭКВ4—160--3	Al	60	2,5	30	160,0	91,70	0,792	2,40	1134	2300	1800	2500	90	
					212,8	89,80	0,811	3,76	1134	2300	1800	2500	145	
ЭКВ4—160—2М*	Cu	60	2,5	30	160,0	94,60	0,816	1,56	1613	2360	1850	4180	79	
					269,8	91,00	0,875	2,40	1613	2360	1850	4180	145	
			90	2,5	160	132,0	91,70	0,760	1,81	1496	2440	2250	4150	109
						171,5	91,10	0,820	2,61	1496	2440	2250	4150	145
ЭКВ4—160—2М* с увеличенным шилицом паза ротора	Al	60	2,5	30	160,0	93,02	0,809	1,26	1741	1741	1 750	4240	87	
					Cu	255,4	91,50	0,855	2,00	1741	1741	1 750	4240	145
ЭКВ4—160—2М- 1*	Al	60	2,5	30	160,0	92,20	0,825	2,36	1521	2800	2 350	4130	93	
					204,8	90,30	0,855	4,02	1521	2800	2 350	4130	145	
ЭКВ4УС2	Al	90	2,5	160	110,0	91,90	0,710	1,77	1416	3150	2 900	3850	118	
					137,3	91,75	0,706	2,42	1416	3150	2 900	3850	145	
ЭКВ5УС	Al	90	1,6	150	160,0	93,90	0,870	1,58	1715	3090	2480	4800	134	
					168,0	93,60	0,875	1,70	1716	3090	2480	4800	145	
2ЭВ5УС	Cu	90	1,6	150	160,0	93,70	0,880	1,46	1695	2200	2200	4850	92	
					228,5	93,00	0,910	2,29	1695	2200	2200	4850	145	

Следует отметить, что в двигателе 2ЭВ5УС (табл. 2) замена алюминия медью не обусловила повышение КПД в отличие от двигателей других габаритов. Опытный образец был выполнен с неравновеликими зубцами ротора (завышенной шириной нижней части паза) и имел высокие потери в стали.

Двигатель может быть в дальнейшем усовершенствован благодаря применению листов пакета ротора с равновеликими зубцами.

Предлагаемая методика учета взаимовлияния значений температуры и материала обмотки ротора, уровня характеристик, а также сравнительные испытания подтверждают целесообразность освоения в серийном производстве асинхронных двигателей с литой медной клеткой, что должно обеспечить более надежную и устойчивую работу электроприводов шахтных комбайнов и стругов. Наиболее массовый выпуск АД ОАО ПЭМЗ им. К. Маркса – электродвигатели ЭКВ3,5 – 90, который значительно превосходит ЭКВ3,5 – 75. Техническая характеристика АД с синхронной частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и частотой тока 50 Гц приведена в табл.3.

Таблица 3

Показатели	2ЭКВ3,5 - 90	ЭКВ3,5—75
Номинальная мощность в режиме S4 при моменте инерции $F_j = 1,2$ , ПВ = 60%, 30 вкл./ч, класс изоляции Н, кВт	101	75
То же, при ПВ = 60 %, 30 вкл./ч, класс изоляции F, кВт	94	65 (25 вкл./ч)
Номинальное напряжение, В	660/1140	660
Номинальный ток, А	60/104	91
Вращающий момент, Н*м:		
Максимальный	1460	900
Пусковой	882	800
КПД, %	87,97	85,4
Коэффициент мощности	0,85	0,81
Масса, кг	465	530

Двигатель может быть в дальнейшем усовершенствован благодаря применению листов пакета ротора с равновеликими зубцами.

Предлагаемая методика учета взаимовлияния значений температуры и материала обмотки ротора, уровня характеристик, а также сравнительные испытания подтверждают целесообразность освоения в серийном производстве асинхронных двигателей с литой медной клеткой, что должно обеспечить более надежную и устойчивую работу электроприводов шахтных комбайнов и стругов. Наиболее массовый выпуск АД ОАО ПЭМЗ им. К. Маркса – электродвигатели ЭКВ3,5 – 90, который значительно превосходит ЭКВ3,5 – 75. Техническая характеристика АД с синхронной частотой вращения  $1500 \text{ мин}^{-1}$  и частотой тока 50 Гц приведена в табл. 4.

Таблица 4

Показатели	Роторы				
	№ 1	№2	№ 1	№ 2	№ 1
Мощность, кВт	100,14/ 76,6	101,43/ 76,5	102,8/ 68,2	102,32/ 76,32	75,3
Напряжение, В	660	660	660	660	740
Ток, А:	117,4/ 91,7	118,6/ 92,5	118,3/ 93,23	118,8/ 93,23	95,6
Пусковой	505	510	530	536	572
Холостого хода	43,4	46,3	50,8	53,3	65,57
КПД, %	87,4/ 87,59	87,97/ 88,03	85,73/ 87,3	86,1/ 87,39	86,13
Скольжение, %	4,48/ 3,69	4,51/ 2,86	5,12/ 3,37	4,1/ 2,6	2,71
Потери холостого хода, кВт	3,725	4,05	4,5	5,25	6,5
Вращающий момент, Н*м:					
Начальный пусковой	881/ 881	811/ 811	938/ 938	1129/ 892	1129
Максимальный	1462/ 1462	1460/ 1460	1588/ 1588	1846/ 1583	1846

Электродвигатели 2ЭКВ3,5—90 выполнены на подшипниках качения и имеют водяное охлаждение статора, обмотка которого изготовлена из жестких секций. В две разные фазы статора встроены датчики, защищающие обмотку от недопустимого перегрева. Ротор короткозамкнутый, глубокопазный, залит медным сплавом. Станины и детали оболочки из стали, литые. Скорость нарастания температуры рабочей обмотки статора при КЗ двигателя с ротором № 1 составляет  $6,6^\circ\text{C}$ , а с ротором № 2 —  $8,2^\circ\text{C}$ . Превышение температуры статорной обмотки, определяемое по сопротивлению, должно быть не больше  $145^\circ\text{C}$ .

Электродвигатель имеет рудничное взрывобезопасное исполнение. Уменьшение его габаритов позволяет установить автономные уплотнения между ним и редуктором комбайна, соединить их с помощью зубчатой муфты вместо шестерни. Применение 2ЭКВ3,5—90 значительно повышает производительность комбайна К-103 и обеспечивает его устойчивую работу на пластах с крепкими и вязкими углями. Техническая характеристика электродвигателей ЭКВ3,5 - 90, работающих в повторно-кратковременном S4 (номинальном) /S1 режимах приведена в табл.4. Следовательно, роторы с литой медной клеткой по оригинальной технологии уменьшают габариты электродвигателя и увеличивают его вращающие моменты (рис. 1) и мощность.

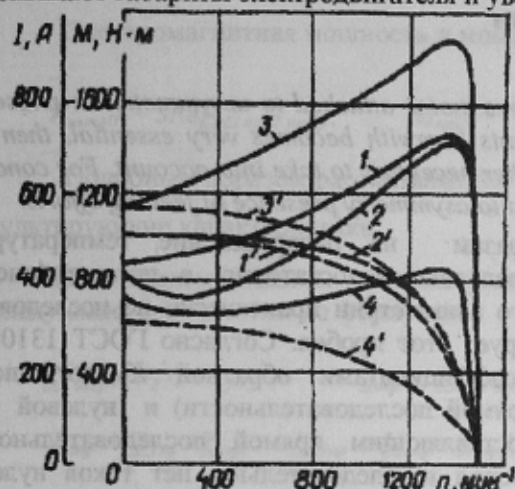


Рисунок 1 - Зависимость момента  $M$  (сплошные кривые) и тока (пунктирные) от частоты  $n$  вращения двигателя 2ЭКВ3,5—90 напряжением 660 В с ротором № 1 (кривые 1 и 1'), № 2 (2 и 2') и напряжением 740 В с ротором № 1 (3 и 3') и серийного двигателя ЭКВ3,5-75 (4 и 4').

Критический вращающий момент электродвигателя 2ЭКВ3,5—90 больше в 1,6 раза (до 1460 Н\*м) электродвигателя ЭКВ3,5—75. Это дает возможность получать по искусственной механической характеристике (при питании от маломощной участковой сети) вращающие моменты более высокие, чем моменты по естественной характеристике электродвигателя ЭКВ3,5—75. Увеличение вращающих моментов сопровождается повышением номинальной мощности в 1,5 раза, т.е. до 101 кВт в режиме S4 при ПВ=60% (30 вкл./ч), что объясняется снижением активного сопротивления роторной обмотки и, следовательно, потерь в ней, увеличением КПД на 2,5% и  $\cos \varphi$ , уменьшением скольжения при одной и той же нагрузке и скольжения при критическом вращающем моменте. Опытные данные не предельны, о чем свидетельствуют результаты испытания электродвигателей при напряжениях 660, 690 и 720 В. Подтверждается правильность направлений совершенствования комбайновых АД, заключающихся в улучшении конструкции роторной клеточки, технологии изготовления литых медных обмоток ротора и создания сплавов с увеличенной электропроводностью и заданными свойствами, в изменении магнитного потока в интенсификации охлаждения, применении новых теплопроводящих паст в сочетании с водяным охлаждением и новых проводниковых материалов.

В настоящее время имеется реальная возможность повышения мощности двигателей с литой медной клеткой для привода скребковых конвейеров мощностью 200, 250, 315, 350 кВт с водяным охлаждением.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чувашев В.А. Совершенствование механической характеристики электродвигателей угольных комбайнов // Взрывозащищенные электрические машины. Сб. Науч. тр. ВНИИВЭ. - Донецк. -1985.
2. Электродвигатели для привода скрепероструготаранной установки УС-2М / И.К. Хрусталеv, А.Н. Бондаренко, А.К. Шубин и др. // Горные машины и автоматика. Сер. Механизация и автоматизация очистных и подготовительных работ. -1970. -Вып. 4 (121).
3. К разработке электродвигателей для привода скрепероструговых установок / И.К. Хрусталеv, А.Н. Бурковский, Л.Б. Ландкоф и др. // Изв. вузов. Горный журнал. -1971. - № 7.
4. Отливка роторов с медной клеткой для врубово-комбайновых электродвигателей / Н.А. Киклевич, В.Ф. Горягин, В.А. Чувашев и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. — М., 1977. — Вып. 3 (73).
5. Ковалев Е.Б. Анализ путей интенсификации охлаждения электродвигателей угледобывающих механизмов // Электротехника. — 1986. — № 10.
6. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробов В.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывонепроницаемого исполнения. — М.: Энергия, 1970.
7. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч.2. Асинхронные и синхронные машины. — М.— Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 416.
8. Сравнительные характеристики новых врубово-комбайновых электродвигателей с повышенной перегрузочной способностью / Н.А. Киклевич, В.А. Чувашев, И.Г. Ширнин и др. // Электротехническая промышленность. Сер. Электрические машины. — 1985— Вып. 5.
9. Макаров К.Д. О допустимом пусковом токе электродвигателей угольных комбайнов // Уголь. - 1983. - №4.