

СРАВНЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЗАКРЫТЫХ ОБДУВАЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ S3, S4, S5

Бурковский А.Н., д.т.н., проф.

Донецкий национальный технический университет

Украина, 83003, Донецк, ул. Карпинского, 25/296, каф. "Электроснабжение промышленных предприятий и городов", тел. (0622) 95-98-83, e-mail: air.ps@mail.ru

Рыбалко О.А.,

Донецкий национальный технический университет

Украина, 83120, Донецк-83120, ул. Пинтера, 52/7, каф. "Электроснабжение промышленных предприятий и городов", тел. (062) 334-88-35, e-mail: olya_ua@list.ru.

Представлені коректні алгоритми визначення допустимого струму обмотки статора закритого асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в режимах S3, S4, S5 і виконані розрахунки для ряду вибухозахищених двигунів в цих режимах з урахуванням коливання температур обмоток статорів. Проведено порівняння навантажувальної здатності двигунів різної потужності і частоти обертання в режимах S3, S4, S5.

Представлены корректные алгоритмы определения допустимого тока обмотки статора закрытого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в режимах S3, S4, S5 и выполнены расчеты для ряда взрывозащищенных двигателей в этих режимах с учетом колебаний температур обмоток статоров. Проведено сравнение нагрузочной способности двигателей различной мощности и частоты вращения в режимах S3, S4, S5.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Закрытые обдуваемые асинхронные двигатели (АД) мощностью до 110 кВт работают в различных отраслях промышленности в повторно-кратковременных режимах S3, S4, S5 (ГОСТ 183).

Способы определения допустимой мощности (тока статора) в этих режимах достаточно хорошо изложены в специальной литературе, в технических условиях на определенные типы двигателей, в учебниках. Во многих случаях допустимый ток обмотки статора в указанных режимах определяется разными способами, в том числе такими, в которых принимаются различные упрощения, приводящие к существенным погрешностям.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Принятые в известных источниках [1, 2] методы определения полезной мощности двигателей в режимах S3, S4 в большинстве случаев дают удовлетворительные результаты, но при некоторых упрощающих допущениях могут давать погрешность до 45–50%. В режимах S5 недостаточно ясным ранее был вопрос определения величины потерь в обмотках в переходном режиме при торможении противовключением, что не давало возможности выполнять корректные расчеты мощности в этих режимах. В последние годы в работе [5] авторами получены положительные результаты по определению допустимого тока обмотки статора в режиме S5, что открывает возможность проведения расчетно-теоретического сравнения нагрузочной способности двигателей в режимах S3, S4, S5.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Определить и сопоставить реальную нагрузочную способность закрытых (взрывозащищенных) АД различных мощностей и полюсностей в режимах работы S3, S4, S5 (ГОСТ 183), рассматривая задачу с единых позиций.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения нагрузочной способности из условия теплового состояния принимаем проверенный метод средних потерь [3, 1, 4, 5], который предусматривает, что средние превышения температуры обмотки статора в режимах S3, S4, S5 равны среднему превышению температуры в номинальном режиме S1.

Допустимый ток обмотки статора в режимах S3, S4, S5 в соответствии с изложенным [4, 5]:

$$I_{(ПВ)_i} = I_{H(S1)} \cdot \sqrt{\frac{\sum \Delta P_{ГР(ПВ)_i} - \Delta P_C}{\sum \Delta P_{ГР(S1)} - \Delta P_C}}, \quad (1)$$

где $\sum \Delta P_{ГР(S1)}$, ΔP_C – сумма греющих потерь в двигателе в номинальном режиме S1 и потери в стали; $\sum \Delta P_{ГР(ПВ)_i}$ – допустимая сумма греющих потерь в двигателе в повторно-кратковременном режиме при работе под нагрузкой:

– в режиме S3:

$$\sum \Delta P_{ГР(ПВ)S3} = \frac{\sum \Delta P_{ГР(S1)} \cdot [\xi + (1 - \xi) \cdot \beta]}{\xi}, \quad (2)$$

где $\xi = t_p / t_{ц}$ – относительная продолжительность включения; t_p , $t_{ц}$ – продолжительность работы под нагрузкой и время цикла, (с); β – коэффициент ухудшения охлаждения АД во время паузы;

– в режимах S4, S5:

$$\sum \Delta P_{ГР(ПВ)S4,S5} = \frac{\sum \Delta P_{ГР(S1)} \cdot t_{ц} [\alpha \cdot \xi' + \xi'' + (1 - \xi' - \xi'') \beta] - A_{\Sigma пер}}{t_p}, \quad (3)$$

где $\alpha = \theta_d / \theta_{п}$; $\beta = \theta_d / \theta_0$; θ_d , $\theta_{п}$, θ_0 – среднее превышение температуры обмотки статора в длительном (нагрузочном), переходном режиме и при паузе при условии одинаковых сумм потерь в двигателе в

каждом из режимов.

Количество выделенной энергии в обмотках статора и ротора во время переходных режимов:

$$\text{– в режиме S4: } A_{\Sigma\text{пер}} = A_{\Sigma\text{пуск}}; \quad (4)$$

$$\text{– в режиме S5: } A_{\Sigma\text{пер}} = A_{\Sigma\text{пуск}} + A_{\Sigma\text{торм}}. \quad (5)$$

Количество выделенной энергии в обмотках АД за пуск в большинстве случаев определяется из решения уравнения движения по статической моментной характеристике АД, т.е. без учета переходных электромагнитных процессов. Осциллографирование токов обмоток статоров на 5 взрывозащищенных АД и расчет потерь энергии в обмотках при пуске по измеренным токам и по статической характеристике показал, что расчетные потери определяются с отклонениями от опытных на величину (-6÷-30%). В работе [6] установлено, что в одних случаях электромагнитные потери влияют на общую величину переходных потерь, в других – незначительно; здесь же дано аналитическое (расчетное) выражение критерия КВ, вычисление которого позволяет определить, нужно ли проводить расчет переходного электромагнитного процесса. В работе [7] получено, что величина потерь в обмотках от переходного электромагнитного процесса при пуске закрытого АД в маломощных сетях составляет $\leq 25\%$ от общей величины потерь в обмотках. Поэтому для практических расчетов взрывозащищенных АД в режимах S4 целесообразно определять пусковые потери по статическим характеристикам с увеличением полученных результатов в 1,25 раз.

В режимах S5 во время переходных режимов выделяются потери энергии при пуске и торможении. Проведенные экспериментальные исследования с осциллографированием тока статора на взрывозащищенном АД типа В100Л4 ($P_{2H} = 4$ кВт) показали, что при торможении противовключением (с различными маховыми массами, $FJ = 4,2 \div 10$) количество выделяемой энергии в обмотках статора и ротора составляет $(0,9 - 1,3)A_{\Sigma\text{пуск}}$ [5]; для практических расчетов можно принять $\Delta A_{\Sigma\text{торм.пр}} \approx \Delta A_{\Sigma\text{пуск}}$.

В режимах S3, S4, S5 температура обмоток колеблется около среднего значения в цикле. С целью установления величины колебания температуры обмотки статора в цикле произведена обработка опытных кривых нагрева В100Л4 в режимах S3, S4, S5.

Получено:

$$\text{– режим S3–40\% } (P_2 = 4 \text{ кВт}) - \theta_{\text{max}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \theta_{\text{min}} \approx 33 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta\theta = \pm 8,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{– режим S4–40\% } (P_2 = 4 \text{ кВт, } 60 \text{ вкл/ч, } \\ FJ = 4,2) - \theta_{\text{max}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}, \theta_{\text{min}} = 41,5 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \Delta\theta = \pm 1,75 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\text{– режим S5–40\% } (P_2 = 4,4 \text{ кВт, } 60 \text{ вкл/ч, } \\ FJ = 4,2) - \theta_{\text{max}} = 57,5 \text{ }^\circ\text{C}, \theta_{\text{min}} = 53,4 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \Delta\theta = \pm 2,05 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Как видно, наибольшее колебание температуры обмотки статора в режиме S3, которое составляет $\pm 8,5^\circ\text{C}$; наименьшее – в режиме S4 – $\Delta\theta = \pm 1,75^\circ\text{C}$. Были проведены также измерения температуры об-

мотки статора двигателя В250М4 ($P_{2H} = 90$ кВт) в режиме S3–40%, которые показали, что колебание температуры составляет $\pm 6\%$, что говорит о сходстве характера изменений температуры в цикле всех двигателей серии.

Колебание температуры обмотки статора в цикле выше среднего значения, которое является допустимым для данного класса изоляции, будет приводить к снижению теплового ресурса изоляции, что не позволит длительно эксплуатировать АД с такой нагрузкой (см. например, [8]).

Для сохранения изменений температуры обмотки статора в повторно-кратковременных режимах в пределах допустимых значений для данного класса изоляции (например, у двигателя В100Л4 – класс В, у В250М4 – класс F) необходимо снижать нагрузку. Детальный анализ для двигателя В100Л4 показал, что снижение тока обмотки статора на 7,5–8% в режиме S3–40% уже позволит снизить температуру до уровня допустимых значений; учитывая также возможное (реальное) рассеяние всех составляющих потерь в двигателях одного и того же типоразмера из-за технологических отклонений, принимаем коэффициент изменения тока в режиме S3 – $K_{I_{S3}} = 0,85$; в режимах S4, S5 – соответственно $K_{I_{S4,S5}} = 0,9$. В таком случае окончательное значение допустимого тока обмотки статора в повторно-кратковременных режимах, рассчитанное по формулам (1)–(5), определяется с учетом K_I .

С целью установления допустимых величин нагрузочных токов в различных повторно-кратковременных режимах были выполнены серии расчетов ранее испытанных взрывозащищенных АД: В100Л4 ($P_{2H} = 4$ кВт); В100Л2 ($P_{2H} = 5,5$ кВт); В112М6 ($P_{2H} = 4$ кВт); В132М8 ($P_{2H} = 5,5$ кВт); В250М4 ($P_{2H} = 90$ кВт). Результаты расчетов по формулам (1) – (5), которые получены с отклонениями от опытов в пределах $\pm 5 - 7\%$, обработаны с учетом коэффициента K_I для снижения нагревов до допустимого уровня приведены в табл. 1.

Из сравнения данных таблицы 1 видно:

– в режимах S3 мощность двигателей, для которых выполнены расчеты (т.е. большинство двигателей серии) может составлять: $(1,47 \div 1,16)P_{2H}$ (меньшие значения на старших габаритах) – при ПВ-15%; $(1,04 \div 0,93)P_{2H}$ – при ПВ-60%;

– в режимах S4 (при $FJ \leq 4$; $Z \leq 120$ вкл/ч) мощность весьма незначительно отличается от мощности в режиме S3 при той же продолжительности включения;

– в режимах S5 с торможением противовключением мощность двигателей с $2p = 4, 6, 8$ незначительно (на $\leq 10 - 12\%$) снижается по сравнению с аналогичным режимом S4 (при $Z = const$; $FJ = const$); двигатели с $2p = 2$ нецелесообразно использовать в режимах S5, т.к. это потребует существенного снижения мощности.

Таблица 1

Тип двигателя (ном. мощность)	S1	S3				FJ	Z	S4; $M_c \equiv n$				Z	S5; $M_c \equiv n$			
	P_{2H} о.е.	$P_{2(S3)}/P_{2H}$, о.е. при ПВ, %						$P_{2(S4)}/P_{2H}$, о.е. при ПВ, %					$P_{2(S5)}/P_{2H}$, о.е. при ПВ, %			
		15	25	40	60			15	25	40	60		15	25	40	60
B100L4 (4 кВт)	1,0	1,47	1,33	1,21	1,04	4,2	30 60 120	1,64 1,59 1,52		1,3 1,26 1,2	1,15 1,12 1,08	30 60 120	1,62 1,57 1,48		1,28 1,2 1,1	1,14 1,08 1,0
B100L2 (5,5 кВт)	1,0		1,32		1,02	5	120		1,0		0,95		-	-	-	-
B112M6 (4 кВт)	1,0		1,22		0,93	4,57	120		1,23		0,95	120		1,16		0,88
B132M8 (5,5 кВт)	1,0		1,27		1,04	2,94	60 120		1,35 1,3		1,08 1,0	60 120		1,29 1,24		0,97 0,93
B250M4 (90 кВт)	1,0	1,16			0,94		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Необходимо отметить, что по алгоритму для режима S3 можно определять допустимый ток двигателей с высотой оси вращения $H \leq 225$ мм; для двигателей с $H = 250, 280$ мм допустимый ток в режиме S3 необходимо определять как в режиме S4 (т.к. значительно сказываются пусковые потери).

В режимах S4, S5 двигатели с $H = 250, 280$ мм длительно работать не могут по условиям нагрева, а в режимах S3 – только со значительным снижением мощности по сравнению с номинальным значением.

ВЫВОДЫ

Рассмотренный метод определения допустимой по условиям нагрева мощности в повторно-кратковременных режимах S3, S4, S5 является достаточно универсальным для различных типов закрытых двигателей, обеспечивающим удовлетворительную точность при правильном учете изменения тепловых нагрузок и условий охлаждения в циклах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Основы автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский / М.: Энергия, 1974. – 567 с.
- [2] Справочник по автоматизированному электроприводу. Под редакцией В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 450 с.
- [3] Голован А.Т. Основы электропривода. М.-Л.: ГЭИ, 1959. – 344 с.
- [4] Бурковский А.Н., Снопик Л.Ф. Расчет полезной мощности взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в повторно-кратковременных режимах работы // Электротехническая промышленность. Электрические машины. – 1978. – №3(85). – С. 8-10.
- [5] Бурковский А.Н., Кустовая Е.Ю., Рыбалко О.А., Шихова Л.К. Определение допустимого тока статора закрытого асинхронного двигателя в повторно-кратковременном режиме с электрическим торможением // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк, 2005. – С. 188-193.
- [6] Кочарян В.Г. Исследование потерь в обмотках двигателя при переходных процессах асинхронного электро-

привода. Автореф. дис. к.т.н.: 05.09.03 / Моск. энерг. ин-т. – М., 1973. – 24 с.

- [7] Мамедов Ф.А., Резниченко В.Ю., Смазнов А.В. Влияние переходных электромагнитных процессов на электрические потери в асинхронном двигателе сельскохозяйственного производства // Тез. докл. 7 Всесоюзной научно-технич. конференции "Состояние и перспективы совершенствования разработки и производства асинхронных двигателей". Владимир. – М.: Информэлектро, 1985. – С. 15-16.
- [8] Федоров М.М., Малеев Д.М. Учет расходуемого ресурса изоляционных материалов обмоток асинхронных двигателей. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 98. – Д.: ДонНТУ, 2005. – С. 22-26.

Поступила 29.08.2006