

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ЧИСЛА РЕВЕРСОВ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Бурковский А.Н., д.т.н., проф.,

Донецкий национальный технический университет

Украина, 83003, Донецк, ул. Карпинского, 25/296, кафедра "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, кафедра "Электроснабжение промышленных предприятий и городов", тел. (062) 334-88-35, e-mail: olya_ua@list.ru.

В статті на основі експериментальних даних обґрунтовано спосіб розрахунку втрат енергії в обмотках асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в перехідних режимах і розроблена методика визначення допустимої кількості реверсів в режимах S7.

В статье на основании экспериментальных данных обоснован способ расчета потерь энергии в обмотках асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в переходных режимах и разработана методика определения допустимого количества реверсов в режимах S7.

Постановка проблемы. Перемежающийся режим с реверсами (S7 по ГОСТ 183-74) состоит из двух основных рабочих фаз: работа под нагрузкой (постоянной) на протяжении определенного отрезка времени, затем осуществляется реверс двигателя (как правило, изменением чередования фаз) и он снова работает с такой же постоянной нагрузкой, вращаясь в противоположном направлении. В таких режимах работают асинхронные двигатели (АД) в различных отраслях промышленности, в том числе в металлургической, машиностроении, химической и др. Способы определения допустимого числа реверсов при заданной величине нагрузочного тока в таких режимах освещены весьма недостаточно, что обусловлено сложностью определения потерь в обмотках при реверсах и их влияния на общий нагрев обмоток при продолжительной работе в таком режиме; поэтому чаще всего эта задача решается экспериментальным способом.

Анализ публикаций и исследований. Определение потерь электроэнергии в обмотках АД в переходных режимах представляет собой весьма сложную задачу, так как эти потери зависят от нагрузки на валу, от механической и электромагнитной инерционности двигателя и т.п. Процесс реверса состоит из торможения противовключением и разгона двигателя в противоположном направлении по сравнению с предыдущим.

Способ определения потерь электроэнергии в обмотках АД при пуске достаточно отработан и дает удовлетворительные результаты, а способы определения потерь электроэнергии при реверсе недостаточно отработаны.

В известной монографии [1] приведена формула для расчета потерь энергии в обмотках при реверсе АД, работающего на холостом ходу:

$$A_{\text{рев}} = 4 \cdot J \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right);$$

где J – суммарный момент инерции привода; ω_0 – угловая частота холостого хода; R_1 , R_2 – сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки ротора; это, однако не дает информации о потерях энергии в обмотках при реверсе АД, работающего под нагрузкой.

Цель статьи. Разработать способ определения допустимого числа реверсов АД с короткозамкнутым ротором в перемежающемся режиме, при заданной величине нагрузочного тока обмотки статора.

Результаты исследований. Для получения информации о величине потерь энергии в обмотках при реверсе АД, работающего под нагрузкой, была произведена обработка осциллограмм пуска и реверса взрывозащищенного АД В100L4 ($P_{2H} = 4$ кВт; $n_H = 1440$ об/мин), нагруженного машиной постоянного тока (рис. 1) при различных коэффициентах инерции FJ . Результаты обработки указанных осциллограмм приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает:

- величина эффективного тока обмотки статора при реверсе (в основном) выше, чем при пуске, что предопределяет более высокое значение эффективного момента двигателя и относительно небольшое время реверса, хотя реверс состоит из торможения от n_H до нуля и разгона до n_H ;

- с увеличением коэффициента инерции увеличивается относительная продолжительность реверса по сравнению с пуском (от 1,36 до 1,58);

- суммарное количество электроэнергии, выделяемой в обмотке статора за реверс ($I_3^2 \cdot \Delta t$) существенно выше, чем при пуске (в 1,42–2,9 раз), в среднем в 2,06 раз.

С целью дополнительного анализа процессов была произведена обработка осциллограмм пуска и

реверса при номинальной нагрузке АД типа P51-4 ($P_{2H} = 12$ кВт; $n_H = 1460$ об/мин), приведенных в монографии [2]. Получено:

- время реверса увеличилось по сравнению с временем пуска в 1,66 раз: ($\frac{t_{рев}}{t_{пуск}} = \frac{1,2}{0,72} = 1,66$);

- количество энергии, выделившееся в обмотке статора за время реверса выше, чем при пуске в 1,745

раз:
$$\left(\frac{\Sigma I_{\Delta}^2 \cdot \Delta t_{рев}}{\Sigma I_{\Delta}^2 \cdot \Delta t_{пуск}} = \frac{22096,8}{12659} = 1,745 \right).$$

Следовательно, можно отметить, что время реверса АД (в рассмотренных примерах) увеличилось в 1,36–1,66 раз (в среднем в 1,5 раз) по сравнению с временем пуска.

Таблица 1

Мощность P_1 , кВт	Коэф. инерции FJ	Время пуска t_n , с	Время реверса t_p , с	Величина эквив. тока статора I_{Δ} , А		Суммарное $I_{\Delta}^2 \cdot \Delta t$, ($A^2 \cdot c$)	
				пуск	реверс	пуск	реверс
4,92	4,2	0,22	0,3	39,6	46,0	345	637,1
4,96	6,2	0,28	0,42	42,2	41,3	499,6	707,2
4,9	10,2	0,48	0,76	36,3	47,6	589,4	1726,5

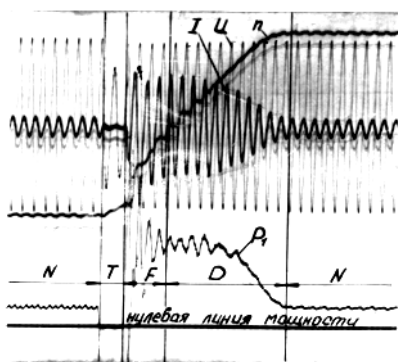


Рис. 1. Осциллограммы переходных значений U, I, P_1, n при работе электродвигателя в режиме S7, $U = 380$ В; $P_1 = 4,92$ кВт; $FJ = 4,2$

Определим допустимое число реверсов в режиме S7 исходя из метода эквивалентного тока. В связи с тем, что за время работы в режиме S7 условия охлаждения АД практически не изменяются, можем записать:

$$I_H^2 \cdot t_{ц} = I_{S7}^2 \cdot t_{раб} + I_{\Delta,рев}^2 \cdot t_{рев}, \quad (1)$$

где I_H , I_{S7} , $I_{\Delta,рев}$ – ток в обмотке статора соответственно в номинальном режиме S1, в режиме S7 под нагрузкой, во время реверса; $t_{ц}$, $t_{раб}$, $t_{рев}$ – продолжительность рабочего цикла, времени работы под нагрузкой и реверса.

Найдем из выражения (1) допустимую длительность работы под нагрузкой $t_{раб}$ в режиме S7:

$$t_{раб} = \frac{I_H^2 \cdot t_{ц} - I_{\Delta,рев}^2 \cdot t_{рев}}{I_{S7}^2}. \quad (2)$$

Произведем некоторые преобразования:

$$t_{раб} \cdot I_{S7}^2 = I_H^2 \cdot (t_{раб} + t_{рев}) - I_{\Delta,рев}^2 \cdot t_{рев}; \quad (3)$$

$$(I_H^2 - I_{S7}^2) \cdot t_{раб} = I_{\Delta,рев}^2 \cdot t_{рев} - I_H^2 \cdot t_{рев}. \quad (4)$$

Выразим

$$I_{\Delta,рев}^2 \cdot t_{рев} = K \cdot A_{рев},$$

где $A_{рев}$ – суммарное количество потерь энергии в обмотках статора и ротора за реверс.

Тогда в соответствии с (4) можем записать:

$$t_{раб} = \frac{K \cdot A_{рев} - I_H^2 \cdot t_{рев}}{I_H^2 - I_{S7}^2}. \quad (5)$$

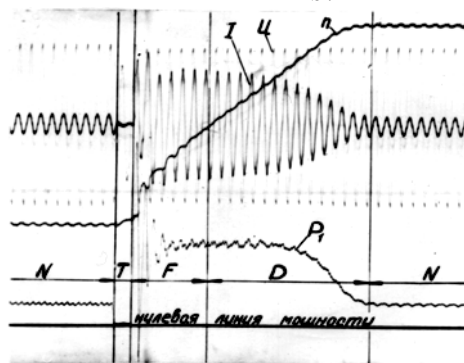


Рис. 2. Осциллограммы переходных значений U, I, P_1, n при работе электродвигателя в режиме S7, $U = 380$ В; $P_1 = 4,96$ кВт; $FJ = 6,2$

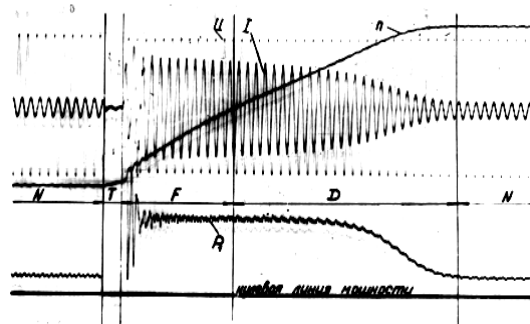


Рис. 3. Осциллограммы переходных значений U, I, P_1, n при работе электродвигателя в режиме S7, $U = 380$ В; $P_1 = 4,9$ кВт; $FJ = 10,2$

Величина суммарного количества потерь энергии в обмотке статора (из условия примерного равенства сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора, т.е. $r_1 \approx r_2'$):

$$\Delta A_{рев.ст} \approx \frac{A_{рев}}{2}, \quad (6)$$

$$I_{\text{э.рев}}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{\Delta A_{\text{ст}}}{3 \cdot r_{1\Gamma}}, \quad (7)$$

где $r_{1\Gamma}$ – величина сопротивления фазы обмотки статора в номинальном режиме (соединение обмоток в звезду).

В соответствии с выражениями (5) и (6) время $t_{\text{раб}}$:

$$t_{\text{раб}} = \frac{A_{\text{рев}} / 2 - I_{\text{н}}^2 \cdot t_{\text{рев}}}{I_{\text{н}}^2 - I_{\text{S7}}^2}. \quad (8)$$

Допустимое число реверсов в час в режиме S7 с учетом (8):

$$Z_{\text{рев}} = \frac{3600}{t_{\text{раб}} + t_{\text{рев}}}. \quad (9)$$

Пример расчета. Взрывозащищенный асинхронный двигатель В100Л4 ($P_{2\text{н}(S1)} = 4$ кВт; $U_{\text{н}} = 380$ В; $I_{\text{н}} = 9,2$ А; $r_{1\Gamma} = 1,73$ Ом).

Определить допустимое число реверсов по предложенному методу с определением потерь энергии при реверсе по (6), (7) и по литературным данным [1] в режиме S7 с параметрами: $FJ = 4,2$; $I_{(S7)} = 8,85$ А.

а) Суммарное количество энергии, выделившееся в обмотках статора и ротора за реверс:

$$A_{\text{рев}\Sigma} = 2 \cdot A_{\text{пуск}\Sigma}.$$

$$A_{\text{пуск}\Sigma} = A_{\text{pn}} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right);$$

$$A_{\text{pn}} = J \cdot \omega^2 \cdot \int_{S_{\text{н}}}^1 \frac{M / M_{\text{н}}}{M / M_{\text{н}} - M_{\text{с}} / M_{\text{н}}} \cdot dS;$$

рассчитано заменой интеграла суммами средних величин моментов при различных величинах скольжения.

$$A_{\text{пуск}\Sigma} = 2073 \text{ Вт с};$$

$$A_{\text{рев}\Sigma} = 2 \cdot 2073 = 4146 \text{ Вт с};$$

$$\Delta A_{\text{рев.ст}} = \frac{A_{\text{рев}\Sigma}}{2} = \frac{4146}{2} = 2073 \text{ Вт с};$$

$$I_{\text{э.рев}}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{\Delta A_{\text{ст}}}{3 \cdot r_{1\Gamma}} = \frac{2073}{3 \cdot 1,73} = 399,4 \text{ А}^2 \text{ с};$$

$$t_{\text{рев}} = 1,5 \cdot t_{\text{пуск}} = 0,33 \text{ с};$$

$$t_{\text{раб}} = \frac{399,4 - 9,2^2 \cdot 0,33}{9,2^2 - 8,85^2} = 58,6 \text{ с}.$$

Длительность рабочего цикла:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{раб}} + t_{\text{рев}} = 58,6 + 0,33 = 58,93 \text{ с}.$$

Допустимое число циклов:

$$Z = \frac{3600}{58,93} = 61,1 \text{ рев/ч};$$

на опыте получено $Z = 60$ рев/ч; отклонение расчета от опыта $\Delta = +1,8\%$.

б) Определим потери энергии при реверсе по литературным данным.

$$\begin{aligned} A_{\text{рев.хх}} &= 4 \cdot J \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = \\ &= 4 \cdot 0,066 \cdot \frac{157^2}{2} \cdot (1 + 0,92) = 6237 \text{ Вт с}; \\ \Delta A_{\text{рев.ст}} &= \frac{6237}{2} = 3118,5 \text{ Вт с}; \\ I_{\text{э.рев}}^2 \cdot t_{\text{р}} &= \frac{3118,5}{3 \cdot 1,73} = 600,8 \text{ А}^2 \text{ с}; \\ t_{\text{раб}} &= \frac{600,8 - 9,2^2 \cdot 0,33}{9,2^2 - 8,85^2} = 94,28 \text{ с}; \\ t_{\text{ц}} &= 94,28 + 0,33 = 94,61 \text{ с}; \\ Z &= \frac{3600}{94,61} = 38,05 \text{ рев/ч}; \end{aligned}$$

отклонение от опыта $\Delta = -36,6\%$.

Вывод. Разработана методика определения допустимого числа реверсов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в режиме S7, которая в целом дает удовлетворительные для практики результаты. В связи с имеющимися место отклонениями величин потерь энергии в обмотках во время реверса от принятых ($A_{\text{рев}\Sigma} = 2 \cdot A_{\text{пуск}\Sigma}$) возможны отклонения допустимых чисел реверсов; в соответствии с нашими опытными данными эти отклонения составляют величины $\leq \pm 20\%$. Поэтому для получения гарантированных величин расчетное число реверсов целесообразно уменьшить на 20 %, что позволит предохранить обмотки от нагревов, превышающих номинальные.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М.Г. Чиликин и др. Основы автоматизированного электропривода. М.: Энергия. 1974. – 465 с.
- [2] И.И. Трещев Электромеханические процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия. 1980. – 344 с.

Поступила 14.10.2005