

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ТОКА СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ РЕЖИМЕ С РЕВЕРСАМИ

Бурковский А.Н., Кустовая Е.Ю., Рыбалко О.А.  
Донецкий национальный технический университет

*The paper contain the results develop of the method define of permissible current of stator winding asynchronous motor with short-circuited rotor in regime with reverse. The examples of calculate and comparison with experiments, which confirm satisfied accuracy of method.*

## 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 металлургической, машиностроения, химической и других. Способы определения допустимого нагрузочного тока обмотки статора в таких режимах при различных числах реверсов освещены весьма недостаточно, что обусловлено сложностью определения потерь в обмотках при реверсах и их влияние 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:

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

где  $J$  - суммарный момент инерции привода,  $\omega_0$  - угловая частота холостого хода,

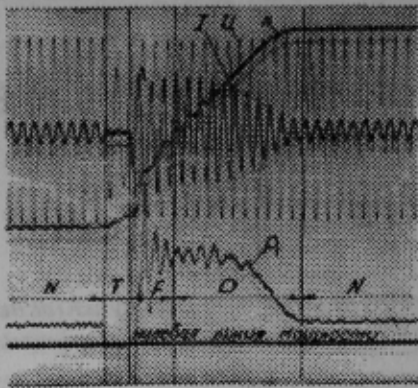
$R_1, R_2'$  - сопротивления обмотки статора и приведенные обмотки ротора; это, однако не дает информации о потерях энергии в обмотках при реверсе АД, работающего под нагрузкой.

**Цель статьи.** Разработать способ расчета допустимого тока обмотки статора в перемежающихся режимах с реверсами.

**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. 1,2,3) при различных коэффициентах инерции  $FJ$ . Результаты обработки указанных осциллограмм приведены в табл. 1

Таблица 1

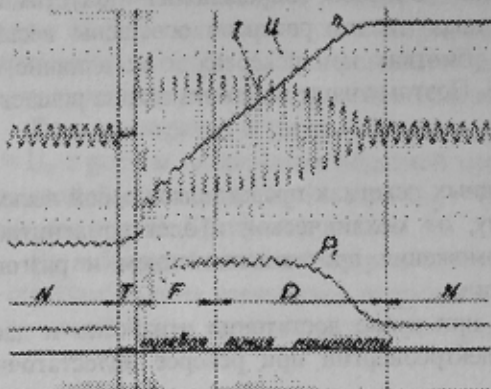
Мощность $P_1$ (кВт)	Коеф. инерции $FJ$	Время пуска $t_n$ (с)	Время реверса $t_p$ (с)	Величина эквивал. тока статора $I_{1\sigma}$ (А)		Суммарное $I_{\sigma}^2 \Delta t$ ( $A^2 c$ )	
				пуск	реверс	пуск	реверс
4,92	4,2	0,22	0,3	39,6	46,0	345	637,1
4,96	6,2	0,28	0,42	42,2	41,3	499,6	707,2
4,9	10,2	0,48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



Осциллограммы переходных значений  $U, I, P, n$  при работе электродвигателя в режиме S7  $U=380В, P_1=4,92, FI=42$

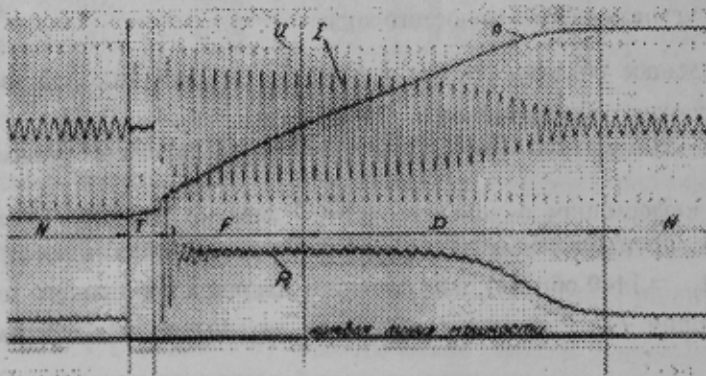
Рисунок 1.

времени пуска) и количество энергии в обмотках.



Осциллограммы переходных значений  $U, I, P, n$  при работе электродвигателя в режиме S7,  $U=380В, P_1=4,96 кВт, FI=0,2$

Рисунок 2



Осциллограммы переходных значений  $U, I, P, n$  при работе электродвигателя в режиме S7,  $U=380В, P_1=4,9 кВт, FI=0,2$

Рисунок 3

$$I_n^2 \cdot t_n = I_{S7} \cdot t_{\text{раб}} + I_{\text{рев}}^2 \cdot t_{\text{рев}} ;$$

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

Из выражения (1) получим величину допустимого тока обмотки статора при работе под нагрузкой:

Анализ данных таблицы 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 ( $I^2 \Delta t$ ) существенно выше, чем при пуске (в 1.42-2.9 раз) в среднем в 2.06 раз.

Из осциллограмм также видно, что при реверсе напряжение на зажимах двигателя снижалось (примерно на 6-7.5%); длительность этого снижения напряжения возрастала с увеличением коэффициента инерции, что соответственно увеличивало относительное время реверса (по отношению к

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,

$$\left( \frac{t_{\text{рев}}}{t_{\text{пуск}}} = \frac{1,2c}{0,72c} = 1,66 \right); \text{ количество энергии, выделившееся}$$

в обмотке статора за время реверса выше, чем при пуске в 1,745 раз,

$$\left( \frac{\sum I_{\text{рев}}^2 \Delta t_{\text{рев}}}{\sum I_{\text{пуск}}^2 \Delta t_{\text{пуск}}} = \frac{22096,8(A^2 \cdot c)}{12659(A^2 \cdot c)} = 1,745. \right)$$

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 со временем пуска.

Количество потерь энергии в обмотке статора (а также и в обмотке ротора) за время реверса увеличивалось в 1,745-2,06 по сравнению с пуском; для практических расчетов можем принять  $\Delta A_{\text{рев}} \approx 2 \Delta A_{\text{пуск}}$ .

Определим допустимую величину тока обмотки статора 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:

$$I_{S7} = \sqrt{\frac{I_H^2 \cdot t_{ц} - I_{Эрес}^2 \cdot t_{рес}}{t_{раб}}} \quad (2)$$

Для выполнения расчетов по формуле (2) необходимо определить величину  $I_{Эрес}^2 \cdot t_{рес}$ .

Определим эту величину из общего количества энергии, выделенной в обмотке статора за реверс ( $\Delta A_{рес.ст.}$ ):

$$\Delta A_{рес.ст.} \cong \frac{A_{рес}}{2}; \quad (3)$$

$$I_{Э}^2 \cdot \Delta t_{рес} = \frac{\Delta A_{рес.ст.}}{3R_1}; \quad (4)$$

где  $R_1$  - сопротивление фазы обмотки статора при номинальном нагреве (обмотка соединена в звезду).

**Примеры расчетов.** Определим допустимую величину тока  $I_{S7}$  для двигателя В100L4 ( $P_{2H} = 4$  кВт;  $I_{H(S1)} = 9,2$  А;  $R_{1гор} = 1,73$  Ом) по предложенному методу с определением потерь при реверсе по (4) и по литературным данным [1] при различных величинах коэффициента инерции и числа реверсов.

1. Режим S7:  $Z=60$  рев/ч;  $FJ=4,2$ ;  $t_{пер} \cong 1,5 t_n = 1,5 \cdot 0,22 = 0,33$  с,  $t_{ц} = 3600/60 = 60$  с;  $t_{раб} = 60 - 0,33 = 59,67$  с.

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

$$A_{рес\Sigma} \cong 2A_{пуск\Sigma} = 2 \cdot 2073 = 4146 \text{ Втс};$$

$$A_{пуск\Sigma} = A_{pn} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right);$$

$$A_{pn} = J \cdot \omega^2 \cdot \int_{s_H}^1 \frac{M/M_H}{M/M_H - M_c/M_H} dS; \quad \text{— рассчитано заменой интеграла суммами средних величин при}$$

различных величинах скольжения,

$$A_{пуск\Sigma} = 2073 \text{ Втс при } FJ=4,2.$$

$$\Delta A_{рес.ст.} \cong \frac{A_{рес\Sigma}}{2} = \frac{4146}{2} = 2073 \text{ Втс.}$$

$$I_{Э}^2 \cdot t_{рес} = \frac{2073}{3 \cdot 1,73} = 399,4 (A^2 \cdot c).$$

$$I_{S7-60} = \sqrt{\frac{9,2^2 \cdot 60 - 399,4}{59,67}} = 8,85 \text{ (А)},$$

на опыте  $I_{S7-60} = 9,1$  А; отклонение расчета от опыта  $\Delta = -2,7\%$ .

По литературным данным [1]:

$$A_{рес\Sigma x.x.} = 4 \cdot J \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right) = 4 \cdot 0,065 \cdot \frac{157^2}{2} (1 + 0,92) = 4 \cdot 1538 = 6152 \text{ Втс};$$

$$\Delta A_{рес.ст.} = \frac{6152}{2} = 3076 \text{ Втс};$$

$$I_{Э}^2 \cdot t_{рес} = \frac{3076}{3 \cdot 1,73} = 592,7 (A^2 \cdot c).$$

$$I'_{S7-60} = \sqrt{\frac{9,2 \cdot 60 - 592,7}{59,67}} = 8,67 \text{ А};$$

отклонение от опыта  $\Delta = -4,7\%$ .

2. Режим S7:  $Z=120$  рев/ч;  $FJ=6,2$ ;  $t_{пер} \cong 1,5 t_n = 1,5 \cdot 0,28 = 0,42$  с,  $t_{ц} = 3600/120 = 30$  с;  $t_{раб} = 30 - 0,42 = 29,58$  с.

$$A_{\text{рев}\Sigma} = \frac{6,2}{4,2} \cdot 4146 = 6120 \text{ Втс}; \Delta A_{\text{рев.см.}} = \frac{6120}{2} = 3060 \text{ Втс};$$

$$I_{\Sigma}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{3060}{3 \cdot 1,73} = 589,6 (A^2 \cdot c); I_{S7-120} = \sqrt{\frac{9,2^2 \cdot 30 - 589,6}{29,58}} = 8,1 \text{ А};$$

на опыте  $I_{S7-120} = 8,38 \text{ А}$ ; отклонение  $-\Delta = -3,4\%$ .

По литературным данным [1]:

$$A_{\text{рев}\Sigma} = \frac{6,2}{4,2} \cdot 6152 = 9081 \text{ Втс};$$

$$\Delta A_{\text{рев.см.}} = \frac{9081}{2} = 4540,5 \text{ Втс};$$

$$I_{\Sigma}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{4540,5}{3 \cdot 1,73} = 874,9 (A^2 \cdot c).$$

$$I'_{S7-120} = \sqrt{\frac{9,2^2 \cdot 30 - 874,9}{29,58}} = 7,5 \text{ (А)}$$

Отклонение от опыта  $\Delta = -10,5\%$ .

3. Режим S7:  $Z=120$  реВ/ч;  $FJ=10,2$ ;  $t_{\text{рен}} \cong 1,5$   $t_{\text{ц}}=1,5 \times 0,48=0,72$  с,  $t_{\text{ц}}=3600/120=30$  с;  $t_{\text{раб}}=29,28$  с.

$$A_{\text{рев}\Sigma} = \frac{10,2}{4,2} \cdot 4146 = 10069 \text{ Втс};$$

$$\Delta A_{\text{рев.см.}} = \frac{10069}{2} = 5034,5 \text{ Втс};$$

$$I_{\Sigma}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{5034,5}{3 \cdot 1,73} = 970 (A^2 \cdot c)$$

$$I_{S7-120} = \sqrt{\frac{9,2^2 \cdot 30 - 970}{29,28}} = 7,3 \text{ (А)};$$

на опыте  $I_{S7-120} = 6,93 \text{ А}$ ; отклонение расчета от опыта  $\Delta = +5,3\%$ .

По литературным данным [1]:

$$A_{\text{рев}} = \frac{10,2}{4,2} \cdot 6152 = 14940 \text{ Втс};$$

$$\Delta A_{\text{рев.см.}} = \frac{14940}{2} = 7470 \text{ Втс};$$

$$I_{\Sigma}^2 \cdot t_{\text{рев}} = \frac{7470}{3 \cdot 1,73} = 1439,4 (A^2 \cdot c)$$

$$I'_{S7-120} = \sqrt{\frac{9,2^2 \cdot 30 - 1439,4}{29,28}} = 6,1 \text{ А}.$$

отклонение от опыта  $\Delta = -10,5\%$ .

Следовательно, по предложенному методу величина допустимого тока статора может быть рассчитана с погрешностью  $-2,7\% \div +5,3\%$ ; расчеты с потерями, определенными по литературным данным (в пределах рассмотренных изменений  $Z$  и  $FJ$ ) дают погрешность:  $-4,7\% \div -10,5\%$ , то есть примерно в два раза больше.

**Вывод.** Обоснован способ расчета потерь энергии в обмотках АД при реверсе и разработан способ определения допустимого тока обмотки статора в режимах S7.

#### 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.