

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРЕВА ОБМОТОК ГРУППЫ МОЩНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ В РЕЖИМЕ САМОЗАПУСКА

Мельник О.А., Нехаева М.А.

Донецкий национальный технический университет

Постановка проблемы. При расчете самозапуска асинхронных двигателей (АД) определяют: выбег за время нарушения электроснабжения, величину напряжения на зажимах двигателя, момент двигателя и избыточный момент, а также время самозапуска. Все эти вопросы рассмотрены в ряде учебных пособий и справочников [1, 2] и являются практическим руководством для их решения. Как правило, расчет заканчивается определением времени самозапуска, которое сравнивается с допустимой величиной времени пуска. Это практическое решение имеет некоторые недостатки: оно не позволяет оценить реальное тепловое состояние обмоток АД (возможных величин их кратковременных перегревов, которые не разрушают двигатель, а накапливают определенные доли теплового износа изоляции обмоток статоров). Кроме того, детальное рассмотрение нагрева обмоток роторов могло бы позволить определить допустимость самозапуска (при тяжелых условиях пуска) или определить их допустимое количество подряд, если вдруг такое потребуется. Публикаций на эту тему недостаточно в связи со сложностью как электромеханических, так и тепловых процессов при самозапуске АД.

Цель работы. Разработка основных положений методики определения нагрева обмоток АД с короткозамкнутым ротором в режиме самозапуска.

Результаты исследований. Общая схема расчета:

1. Расчет напряжения на зажимах двигателей при самозапуске группы АД будем выполнять для наиболее характерной схемы питания и ее схемы замещения, рис. 1.

При расчете принимаем $U_{сист} = 1,05 \cdot U_{ном}$.

2. Кривые выбега могут определяться различными способами (экспериментально или расчетом).

В расчетной модели примем расчет с применением численного метода Эйлера [2]:

$$\Delta n_{ij} = (M_{дей} - M_{ср}) \cdot \frac{\Delta t}{T_j},$$

где Δt - промежуток времени,

При выбеге:

$$\Delta n_{ij} = -M_c \cdot \frac{\Delta t}{T_j},$$

где T_j - механическая постоянная времени агрегата, с:

$$T_j = \frac{4 \cdot J_{\Sigma} \cdot n_{ном}^2}{364000 \cdot P_{ном}},$$

где $P_{ном}$ - полезная мощность АД, кВт,

J_{Σ} - момент инерции агрегата (двигателя и механизма), кгм².

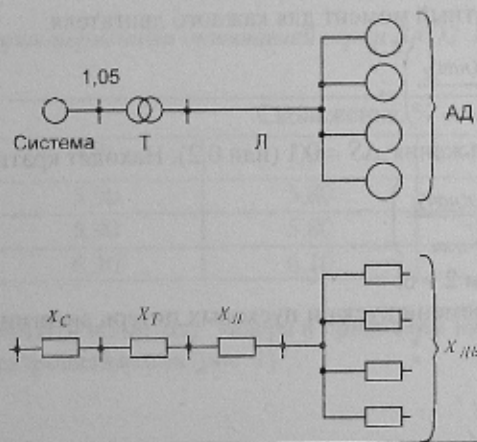


Рисунок 1 – Схема питания асинхронных двигателей и ее схема замещения

3. Моментные характеристики АД можем определить известными методами (например, изложенными в учебных пособиях по электрическим машинам, электроснабжению, электроприводу). В конкретном примере считаем характеристики АД известными.

4. Токовая характеристика для каждого АД: $I = f(S)$, может быть или принята в соответствии с техническими условиями (ТУ) на этот двигатель или рассчитана приближенным методом.

Ток, потребляемый из сети при разгоне АД [2], А:

$$I_{Д,j} = K_{П,j} \cdot K_{ij} \cdot K_u \cdot I_{ном} / \sqrt{3};$$

$$K_{ij} = \sqrt{1 + S_{кр}^2} / \sqrt{1 + (S_{кр}/S_{ij})^2},$$

где $K_{П,j}$ - кратность пускового тока АД при $U_{ном}$ и $S = 1$, о.е.;

S_{ij} - текущее скольжение, о.е.

Ток, потребляемый из сети, отнесенный к номинальному току $I_{ном}$ АД, о.е.:

$$I_{Д,j}^* = K_{П,j} \cdot K_{ij} \cdot K_u.$$

Для конкретного расчета принимаем токовые характеристики в соответствии с ТУ на двигателе, т.к. это достоверные данные.

Характеристики моментов сопротивления рабочих механизмов считаем известными.

Общий порядок расчета. В основу расчета самозапуска положен метод последовательных интервалов.

1. Определяют время перерыва питания ($t_{пр}$) для группы двигателей (оно задано на основе анализа устройств релейной защиты или задается).

Для заданного времени $t_{пр}$ по кривым выбега определяют скорость вращения в начале самозапуска $n^* = n_i/n_n$ и соответствующую ей величину скольжения S .

2. Определяют сопротивления двигателей для найденного скольжения, определяют ток при этом скольжении:

$$K_{I,j} \equiv I_{Д,j}^*; X_{дв,j} = \frac{1}{K_{I,j}} \cdot Z_{ном,j};$$

$$Z_{ном,j} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном}};$$

$$X_{дв,\Sigma i} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{1}{X_{дв,j}}}.$$

3. Определяют результирующее сопротивление схемы замещения:

$$X_{\Sigma i} = X_{дв,\Sigma i} + X_T + X_C + X_{Л}.$$

4. Определяют ток самозапуска всех двигателей в начале самозапуска:

$$I_{сз(\нач)_i} = \frac{1,05 \cdot U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma i}}.$$

5. Определяют напряжение на шинах секции, от которой питается двигатель, в начале самозапуска:

$$U_{сз(\нач)_i} = \sqrt{3} \cdot I_{сз(\нач)_i} \cdot X_{дв,\Sigma i}.$$

6. Определяют электромагнитный момент для каждого двигателя:

$$M_{сз,j(\нач)_i} = M_{(S_i)} U_{ном} \left(\frac{U_{сз(\нач)_i}}{U_{ном}} \right)^2;$$

7. Принимают интервал скольжения $\Delta S = 0,1$ (или 0,2). Находят кратность тока при данном скольжении:

$$K_{I,j(S_{i+1})} = K_{I(S_{i+1})} U_{ном} \left(\frac{U_{сз(\нач)_i}}{U_{ном}} \right).$$

Повторяют расчет по пунктам 2 – 6.

8. Для расчета интервалов времени пуска и пусковых потерь энергии в обмотке ротора вычисляют коэффициенты:

$$a_i = M_i / M_H, \quad a_{i+1} = M_{i+1} / M_H;$$

$$b_i = M_{C_i} / M_H, \quad b_{i+1} = M_{C_{i+1}} / M_H;$$

$$c_i = a_i - b_i, \quad c_{i+1} = a_{i+1} - b_{i+1};$$

$$d_i = 1/c_i, d_{i+1} = 1/c_{i+1};$$

$$e_i = a_i/c_i, e_{i+1} = a_{i+1}/c_{i+1};$$

$$f_i = e_i \cdot S_i, f_{i+1} = e_{i+1} \cdot S_{i+1}.$$

9. Вычисляют интервал времени, за который скольжение изменяется на ΔS :

$$\Delta t_{mi} = J \cdot \frac{\omega_1}{M_H} \cdot \Delta S \cdot \frac{d_{(S_i)} + d_{(S_{i+1})}}{2}.$$

10. Выполняют расчеты по пп. 2 – 9 для всех интервалов скольжения, затем вычисляют общее время пуска $t_n = \sum \Delta t_{mi}$; а также общее количество энергии, выделившееся в обмотке ротора за пуск:

$$A_{pn} = J \cdot \omega_1^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{n \cdot K_n}.$$

11. Затем определяют величины потерь энергии в обмотке ротора на каждом интервале времени Δt_{mi} при изменении скольжения на ΔS , а затем потери мощности в короткозамыкающих кольцах и стержнях, которые распределяем между узлами тепловой схемы замещения.

Пример расчета. Группа АД состоит из четырехполюсных двигателей мощностью 200, 400, 800 кВт ($U = 6$ кВ), которые работают в качестве привода насосов и вентиляторов.

Технические данные двигателей приведены в табл. 1, моментные и токовые характеристики – в табл. 2, 3.

Таблица 1 – Технические данные двигателей серии ВАО2 на напряжение 6 кВ

Обозначение двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	η , %	$\cos \varphi$	Ном. скольжение, %	$I_{ном}$, А	Критическое скольжение, %
450S-4	200	1500	93,7	0,88	1,3	23,4	0,09
450LB-4	400	1500	95,2	0,89	1,5	45,5	0,09
560LA-4	800	1500	95,7	0,90	0,9	89,5	0,031

Таблица 2 – Моментные характеристики двигателей серии ВАО2 $M_i / M_{ном}$

Обозначение двигателя	Скольжение, %								Критическое
	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,2	
450S-4	1,2	1,05	1,09	1,12	1,18	1,32	1,49	2,27	2,5
450LB-4	1,2	1,23	1,26	1,30	1,35	1,52	1,71	2,35	2,5
560LA-4	1,3	1,26	1,22	1,25	1,27	1,30	1,36	1,55	2,5

Таблица 3 – Токовые характеристики двигателей серии ВАО2 $K_I = \frac{I_i}{I_{ном}} = f(S)$

Обозначение двигателя	Скольжение, %				
	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2
450S-4	6,0	5,90	5,80	5,70	5,20
450LB-4	6,0	5,90	5,80	5,80	5,20
560LA-4	6,5	6,30	6,10	5,90	5,70

Кривые выбега двигателей рассчитаны по методу Эйлера и приведены на рис. 2.

Параметры элементов схемы электроснабжения (рис. 1).

Система: $S_{кр} = 1000$ МВА;

$$X_C = \frac{U_{ном}^2}{S_{кр}} = \frac{6,3^2}{1000} = 0,04 \text{ Ом.}$$

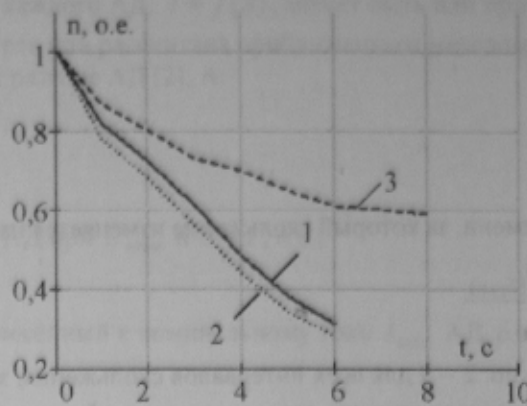


Рисунок 2 – Кривые выбега двигателей серии ВАО2 мощностью 200, 400 и 800 кВт соответственно

Трансформатор: $S_{ном} = 10 \text{ МВА}$; $U_K = 10,5\%$;

$$X_T = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{6,3^2}{10} = 0,417 \text{ Ом.}$$

Воздушная линия: $l = 0,8 \text{ км}$; $X_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$;

$$X_{л} = X_0 \cdot l = 0,4 \cdot 0,8 = 0,32 \text{ Ом.}$$

Принимаем перерыв питания $t_{пр} = 1 \text{ с}$.

По кривым выбега находим частоты вращения (и скольжение) всех двигателей при $t_{пр} = 1 \text{ с}$:

- для двигателя М1 (200 кВт) - $n_1 = 0,82 \cdot n_{ном}$; $S_1 = 0,18$;
- для двигателя М2, М3 (400 кВт) - $n_2 = n_3 = 0,78 \cdot n_{ном}$; $S_2 = S_3 = 0,22$;
- для двигателя М4 (800 кВт) - $n_4 = 0,87 \cdot n_{ном}$; $S_4 = 0,13$.

По токовым характеристикам при известных скольжениях $S_1 \dots S_4$ находим текущие значения кратностей

токов:

$$\text{М1} - S_1 = 0,18; K_{I1} = 0,84 \cdot 6,0 = 5,05; I_{ном1} = 23,4 \text{ А};$$

$$\text{М2 (М3)} - S_2 = 0,22; K_{I2} = 0,86 \cdot 6,0 = 5,2; I_{ном2} = 45,5 \text{ А};$$

$$\text{М4} - S_4 = 0,13; K_{I4} = 0,81 \cdot 6,5 = 5,25; I_{ном4} = 89,5 \text{ А}.$$

Определяем сопротивления двигателей:

$$X_{двj} = \frac{1}{K_{Ij}} \cdot Z_{номj}; Z_{номj} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{ном}}$$

$$\text{М1} - Z_{ном1} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 23,4} = 148,2 \text{ Ом}; X_{дв.1} = \frac{1}{5,05} \cdot 148,2 = 29,35 \text{ Ом};$$

$$\text{М2 (М3)} - Z_{ном.2} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 45,5} = 76,2 \text{ Ом}; X_{дв.2} = \frac{1}{5,2} \cdot 76,2 = 14,65 \text{ Ом};$$

$$\text{М4} - Z_{ном.4} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 89,5} = 38,75 \text{ Ом}; X_{дв.4} = \frac{1}{5,25} \cdot 38,75 = 7,38 \text{ Ом}.$$

Определяем суммарное сопротивление всех двигателей:

$$X_{дв\Sigma} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{X_{дв.j}}} = \frac{1}{\frac{1}{29,35} + \frac{1}{14,65} + \frac{1}{14,65} + \frac{1}{7,38}} = 3,268 \text{ Ом}.$$

Определяем суммарное сопротивление:

$$X_{\Sigma} = X_C + X_T + X_{л} + X_{дв\Sigma} = 0,04 + 0,417 + 0,32 + 3,268 = 4,045 \text{ Ом}.$$

Определяем напряжение на шинах секции, от которой питаются двигатели, в начале самозапуска:

$$U_{сз(нач)} = \frac{1,05 \cdot U_{ном} \cdot X_{дв\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{1,05 \cdot 6,3 \cdot 3,268}{4,045} = 5,344 \text{ кВ}.$$

Определяем электромагнитный момент для двигателя 400 кВт:

$$M_{сз.2(нач)1} = M_{(S_1)U_{ном}} \left(\frac{U_{сз(нач)1}}{U_{ном}} \right)^2 = 2,35 \cdot \left(\frac{5,344}{6,3} \right)^2 = 1,691 \text{ о.е.}$$

Принимаем интервал скольжения $\Delta S = 0,1$. Находим кратность тока при данном скольжении:

$$K_{I,j(S_2)} = K_{I(S_2)U_{ном}} \left(\frac{U_{сз(нач)1}}{U_{ном}} \right).$$

$$M1 - S_1 = 0,08; K_{I,1(S_2)} = 3,65 \cdot \left(\frac{5,344}{6,3} \right) = 3,096;$$

$$M2 (M3) - S_2 = 0,12; K_{I,2(S_2)} = 4,1 \cdot \left(\frac{5,344}{6,3} \right) = 3,478;$$

$$M4 - S_4 = 0,03; K_{I,4(S_2)} = 1,85 \cdot \left(\frac{5,344}{6,3} \right) = 1,569.$$

Определяем сопротивления двигателей:

$$M1 - X_{дв.1} = \frac{1}{3,096} \cdot 148,2 = 47,865 \text{ Ом};$$

$$M2 (M3) - X_{дв.2} = \frac{1}{3,478} \cdot 76,2 = 21,967 \text{ Ом};$$

$$M4 - X_{дв.4} = \frac{1}{1,569} \cdot 38,75 = 24,692 \text{ Ом}.$$

Определяем суммарное сопротивление всех двигателей:

$$X_{дв\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{47,865} + \frac{1}{21,967} + \frac{1}{21,967} + \frac{1}{24,692}} = 6,56 \text{ Ом}.$$

Определяем суммарное сопротивление:

$$X_{\Sigma} = 0,04 + 0,417 + 0,32 + 6,56 = 7,337 \text{ Ом}.$$

Определяем напряжение на шинах секции, от которой питаются двигатели:

$$U_{сз(нач)2} = \frac{1,05 \cdot 6,3 \cdot 6,56}{7,337} = 5,914 \text{ кВ}.$$

Определяем электромагнитный момент для двигателя 400 кВт:

$$M_{сз.2(нач)2} = 2,5 \cdot \left(\frac{5,914}{6,3} \right)^2 = 2,203 \text{ о.е.}$$

Для расчета интервалов времени пуска и пусковых потерь энергии в обмотке ротора двигателя 400 кВт вычисляем коэффициенты:

$$a_1 = \frac{M_1}{M_H} = 1,691, a_2 = \frac{M_2}{M_H} = 2,203;$$

$$b_1 = \frac{M_{C1}}{M_H} = 0,68, b_2 = \frac{M_{C2}}{M_H} = 0,78;$$

$$c_1 = a_1 - b_1 = 1,691 - 0,68 = 1,011, c_2 = a_2 - b_2 = 2,203 - 0,78 = 1,423;$$

$$d_1 = \frac{1}{c_1} = \frac{1}{1,011} = 0,989, d_2 = \frac{1}{c_2} = \frac{1}{1,423} = 0,703;$$

$$e_1 = \frac{a_1}{c_1} = \frac{1,691}{1,011} = 1,673, e_2 = \frac{a_2}{c_2} = \frac{2,203}{1,423} = 1,548;$$

$$f_1 = e_1 \cdot S_1 = 1,673 \cdot 0,22 = 0,368, f_2 = e_2 \cdot S_2 = 1,548 \cdot 0,12 = 0,186.$$

Вычисляем интервал времени, за который скольжение изменяется на $\Delta S = 0,1$:

$$\Delta t_{п1} = J \cdot \frac{\omega_1}{M_H} \cdot \Delta S \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} = 5,382 \cdot \frac{155,037}{264} \cdot 0,1 \cdot \frac{0,989 + 0,703}{2} = 0,267 \text{ с}.$$

Выполняем расчеты для всех интервалов скольжения, затем вычисляем общее время пуска $t_n = \sum \Delta t_{пi}$; а также общее количество энергии, выделившееся в обмотке ротора за пуск $A_{рп}$.

С помощью алгоритма расчета пуска [3] рассчитываем греющие потери в стержнях ротора АД. Результаты расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты расчета интервалов времени самозапуска и греющих потерь в стержнях ротора

	Скольжение, %	
	0,22-0,12	0,12-0,015
$\Delta t_{mi}, \text{с}$	0,267	0,2
$\Delta P_{cmi} \times 10^5, \text{Вт}$	9,474	3,171

Общее время самозапуска $t_{сз} = 0.467 \text{ с}$. Распределяем потери в стержнях между тремя участками обмотки соответственно [3]. После расчета системы дифференциальных уравнений получаем кривые нагрева обмотки ротора АД мощностью 400 кВт (рис. 3).

Система дифференциальных уравнений ротора АД мощностью 400 кВт:

$$3403,2 \frac{d\theta_1}{dt} + 9320 \cdot \theta_1 - 8130 \cdot \theta_2 - 1190 \cdot \theta_4 = P_1(t);$$

$$3403,2 \frac{d\theta_2}{dt} + 13928 \cdot \theta_2 - 8130 \cdot \theta_1 - 4608 \cdot \theta_3 - 1190 \cdot \theta_4 = P_2(t);$$

$$11202,2 \frac{d\theta_3}{dt} + 6569 \cdot \theta_3 - 4608 \cdot \theta_2 - 1961 \cdot \theta_4 = P_3(t);$$

$$55920 \frac{d\theta_4}{dt} + 4341 \cdot \theta_4 - 1190 \cdot \theta_1 - 1190 \cdot \theta_2 - 1961 \cdot \theta_3 = P_4.$$

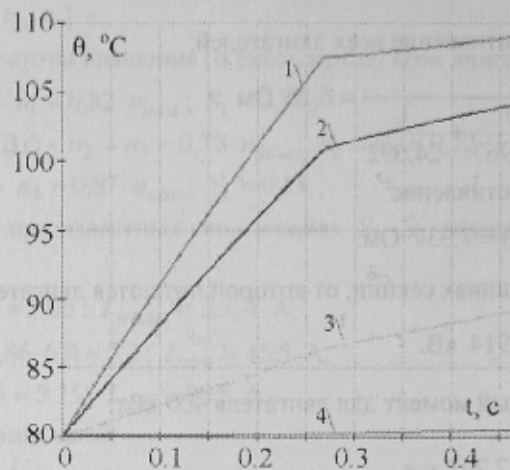


Рисунок 3 – Кривые нагрева обмотки ротора двигателя ВАО2-450LB-4 (400 кВт) при самозапуске в функции времени ($t_{нм} = 1 \text{ с}$); где 1, 2 – верхняя и нижняя части пусковой обмотки соответственно; 3 – рабочая обмотка; 4 – железо ротора (зубцы)

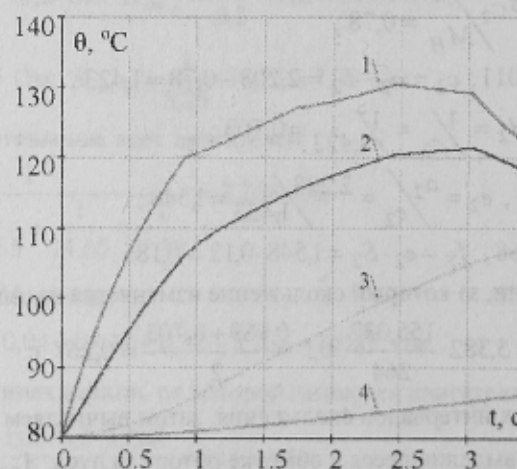


Рисунок 4 – Кривые нагрева обмотки ротора двигателя ВАО2-450LB-4 (400 кВт) при самозапуске в функции времени ($t_{нм} = 10 \text{ с}$)

Далее был проведен расчет нагрева АД мощностью 400 кВт при длительности перерыва питания $t_{nm} = 10$ с. Общее время самозапуска $t_{сз} = 3,335$ с. После расчета системы дифференциальных уравнений получаем кривые нагрева обмотки ротора исследуемого АД (рис. 4) при $t_{nm} = 10$ с.

Были выполнены практические расчеты самозапуска группы АД (ВАО2-450S-4, 200 кВт (один); ВАО2-450LB-4, 400 кВт (два); ВАО2-560LA-4, 800 кВт (один)), которые работают в приводах насосов и вентиляторов. Получены кривые нагрева обмоток роторов в функции времени самозапуска; наибольшие величины нагрева (превышение температуры) пусковой обмотки ротора составляют $150 + 160^\circ C$, что в границах допустимых величин; при этом время самозапуска двигателей было $\leq (3,33 - 9,51)$ с.

По этим расчетам можно сделать такие замечания: если при расчете окажется, что $\theta_{пуск.обм} \geq 320 - 350^\circ C$, то такой самозапуск нельзя допускать; это разрешит отвергнуть аварийную остановку производства со всеми возможными последствиями.

Были выполнены расчеты нагрева обмоток статоров указанных двигателей при самозапуске. За время пуска обмотки статоров двигателей, которые работали в номинальном режиме и имели номинальное превышение температуры ($\theta_1 \approx 80^\circ C$) после перерыва в питании ($t_{nm} = 1$ с), при подаче напряжения получили дополнительный прирост нагрева: двигатель 200 кВт – $\Delta\theta_1 = 28,6^\circ C$; 400 кВт – $\Delta\theta_1 = 11,5^\circ C$; 800 кВт – $\Delta\theta_1 = 38,2^\circ C$.

При этом температура обмоток превышает допустимую для изоляции класса нагревостойкости В (допустимое превышение температуры $\theta^* = 80^\circ C$) на $12 - 38^\circ C$.

За единицы секунд практически никаких изменений в тепловом состоянии обмоток статоров не будет; поэтому можем полученные приращения нагрева прибавить к номинальному превышению температуры обмотки статора ($\theta_1 \approx 80^\circ C$). В первый момент превышения температур составят: двигатель 200 кВт – $\theta_{1(nm)} \approx 108,6^\circ C$; 400 кВт – $\theta_{1(nm)} \approx 91,5^\circ C$; 800 кВт – $\theta_{1(nm)} \approx 118,2^\circ C$.

Далее двигатели работают в номинальном режиме и нагревы обмоток статоров будут постепенно снижаться к номинальным значениям.

Дополнительные превышения температуры приведут к дополнительному тепловому износу изоляции обмотки статора.

Вывод. Разработаны основы комплексной методики расчета самозапуска группы АД: 1) расчет кривых выбега АД с короткозамкнутым ротором после обесточивания; 2) составлены алгоритмы расчета параметров группы АД, которые принимают участие в самозапуске; 3) разработан практический алгоритм расчета потерь в обмотках АД и нагрева обмоток при полном учете изменения параметров, величин напряжения и моментов двигателей, а также величины потерь в каждой части обмотки глубокопазного ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перехідні процеси в системах електропостачання власних потреб електростанцій: Навч. посібник / В.Ф. Сивокобиленко, В.К. Лебедев – Донецьк: РВА ДонНТУ, 2002. – 136 с.
2. Баумштейн И.А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения. – М., 1989. – 768 с.
3. Бурковский А.Н., Рыбалко О.А. Методичні питання визначення нагрівання обмоток потужних асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором в пусковому режимі // Електротехніка і Електромеханіка, №4. – 2006, С. 16-21.