

**А.Н. Бурковский,
О.А. Федюк,
О.А. Рыбалко,
Л.К. Шихова,
Л.Д. Ильюшенкова**

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ ЗАКРЫТОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В КРАТКОВРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Постановка проблемы.

В ряде электроприводов асинхронные двигатели (АД) работают в кратковременных режимах, в которых в течение отдельных отрезков времени работы нагрузка имеет различную величину, значительно большую, чем в продолжительном номинальном режиме, что может привести к повышенным нагревам и снижению ресурса изоляции. Поэтому для обеспечения надёжной работы АД в таких режимах необходимо установить допустимый уровень нагрузок.

Вопросы определения допустимой из условия нагрева обмотки статора мощности АД с короткозамкнутым ротором в кратковременном режиме с постоянной нагрузкой (S2 по ГОСТ 183-74) достаточно отработаны. В частности, в [1] изложен метод определения допустимой мощности (тока статора) в режимах S2 при времени нагружения $t_{нагр} = 10, 30, 60, 90$ мин, а в [2]—при $t_{нагр} \leq 10$ мин при максимально возможных нагрузках, которые обеспечивают определение мощности с удовлетворительной точностью.

В практике эксплуатации нередко встречаются кратковременные режимы (нестандартные), в которых на протяжении короткого интервала времени (до 1 часа) величина нагрузки ступенчато изменяется (по двум или трем ступеням). В таком случае применить методы определения мощности, изложенные в [1] или [2] сложно, т.к. при работе с каждой ступенью нагрузки превышение температуры обмотки статора не должно быть выше допустимого для данного класса нагревостойкости изоляции, а греющие потери при этом изменяются.

В работе [3] изложен метод определения мощности при ступенчатом изменении нагрузки, который практически применяется. Исходя из метода эквивалентной мощности (или тока) предлагается определять эквивалентную мощность двигателя в режиме со ступенчатым изменением нагрузки (рис.1) по зависимости:

$$P_{\text{Э.тп.см}} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot t_i}{t_{\text{п.см}}}} \leq P_{\text{ном.тп.см}}, \quad (1)$$

где P_i -- ступени мощности на каждом интервале времени t_i ;

$t_{p.cm}$ -- стандартное время кратковременного режима при одноступенчатой нагрузке (т.е. постоянной);

$P_{ном.кр.см}$ -- номинальная мощность двигателя в кратковременном режиме при стандартной продолжительности нагружения $t_{p.cm}$.

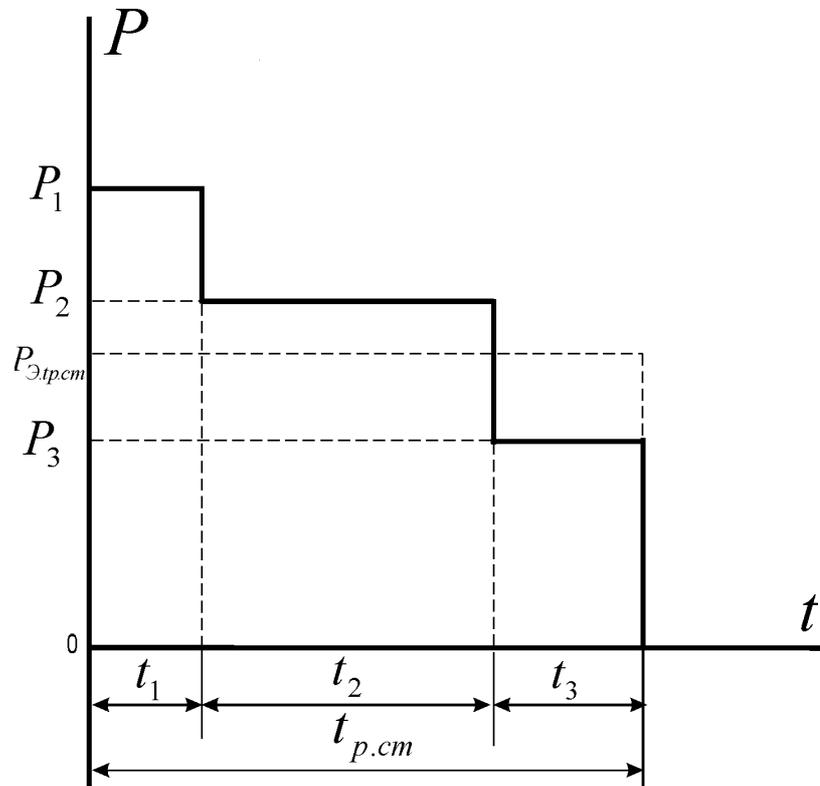


Рисунок 1-К определению $P_{Э.кр.см}$ при работе электродвигателя в режиме S2

В качестве примера определим в соответствии с этой зависимостью величины нагрузки на трех ступенях для взрывозащищенного двигателя В100L-4 (мощность в номинальном режиме S1 -- $P_{2H} = 4$ кВт; превышение температуры статора $\theta_{1.обм.н} = 78^\circ C$; $T_H = 30$ мин.; $U_H = 380$ В).

Мощность в стандартном режиме S2—60 мин: $P_{2(S2-60)} = 4,71$ кВт при допустимом превышении температуры $[\Theta_1] = 85^\circ C$ (изоляция класса В)—в соответствии с опытными данными.

Принимаем ступени нагрузки:

-- $P_{2i1} = 6,07$ кВт – на протяжении $\Delta t_{i1} = 10$ мин;

-- $P_{2i2} = 5,36$ кВт – на протяжении $\Delta t_{i2} = 30$ мин;

-- $P_{2i3} = 4$ кВт – на протяжении $\Delta t_{i3} = 20$ мин.

Общая продолжительность работы под нагрузкой составляет:

$$t_{p.cm} = \sum \Delta t_i = 10 + 30 + 20 = 60 \text{ мин.}$$

По выражению (1) получим:

$$P_{\text{э.т.р.см}} = \sqrt{\frac{6,07^2 \cdot 10 + 5,36^2 \cdot 30 + 4,0^2 \cdot 20}{60}} = 4,67 \text{ кВт.}$$

Полученная величина мощности практически совпадает со стандартной мощностью в режиме S2-60 мин. и значит, в соответствии с этим методом, можно таким образом нагружать двигатель.

Цель статьи. Разработать способ определения допустимой мощности АД в кратковременном режиме с многоступенчатым графиком нагрузки при условии нагрева обмотки статора в допустимых пределах для данного класса нагревостойкости изоляции.

Результаты исследований.

В данном случае мы располагаем достоверными опытными данными по нагреву обмотки статора при указанных величинах мощности за соответствующие интервалы времени нагружения:

- при мощности $P_{2i1} = 6,07$ кВт за $\Delta t_{i1} = 10$ мин -- превышение температуры обмотки статора достигает $\theta_{1i1} = 85^\circ \text{C}$;

- при мощности $P_{2i2} = 5,36$ кВт за $\Delta t_{i2} = 30$ мин -- превышение температуры обмотки статора (при нагреве с холодного состояния) достигает $\theta_{1i2} = 85^\circ \text{C}$;

при мощности $P_{2i3} = 4$ кВт за $\Delta t_{i3} = 20$ мин при нагреве с холодного состояния $\theta_{1i3} = 38,5^\circ \text{C}$.

Для расчета кривой нагрева при таком изменении нагрузки воспользуемся известным выражением:

$$\theta_1(t) = \theta_{10} \cdot e^{-t/T} + \theta_{yi}(1 - e^{-t/T}), \quad (2)$$

где θ_{10} -- начальное превышение температуры.

Более точно это выражение в соответствии с [1] имеет вид:

$$\theta_1(t) = \theta_{10} \cdot e^{-t/[T_0 + (T_H - T_0) \cdot (1 - e^{-t/T_H})]} + \theta_{yi} \cdot (1 - e^{-t/[T_0 + (T_H - T_0) \cdot (1 - e^{-t/T_H})]}) \cdot (1 + 1,05 \cdot e^{-4t/T_H}), \quad (3)$$

где $T_0 = T_H \cdot \frac{D_i}{D_a}$ начальная постоянная времени нагрева статора двигателя;

T_H -- постоянная времени нагрева при номинальной нагрузке;

D_a , D_i , -- диаметры расточки и наружный диаметр сердечника статора.
Считая, что работа начинается с холодного состояния, то за первые 10 мин. (при $P_{2i1} = 6,07$ кВт) превышение температуры составит $\theta_{1(10\text{ мин})} = 85^\circ \text{C}$.

За вторые 30 мин превышение температуры составит (при $T_0 = 30 \cdot \frac{10,8}{17,3} = 18,7$ мин):

$$\begin{aligned} \theta_{12}(30) &= 85 \cdot e^{-30/[18,7+(30-18,7) \cdot (1-e^{-30/30})]} + \\ &+ 123 \cdot (1 - e^{-30/[18,7+(30-18,7) \cdot (1-e^{-30/30})]}) \cdot (1 + 1,05 \cdot e^{-4 \cdot 30/30}) = \\ &= 26,6 + 86,2 = 112,8^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

С учетом изменения $T = f(I/I_H)$ -- на втором интервале времени нагружения получим $\theta_{12(30)} = 112,1^\circ \text{C}$; поэтому для упрощения расчет выполняется без учета этого фактора.

На третьей ступени нагружения ($t = 20$ мин):

$$\begin{aligned} \theta_{13}(20) &= 112,8 \cdot e^{-20/[18,7+(30-18,7) \cdot (1-e^{-20/30})]} + \\ &+ 78 \cdot (1 - e^{-20/[18,7+(30-18,7) \cdot (1-e^{-20/30})]}) \cdot (1 + 1,05 \cdot e^{-4 \cdot 20/30}) = \\ &= 49,35 + 47,05 = 96,4^\circ \text{C}. \end{aligned}$$

На протяжении второго и третьего интервалов нагружения среднее превышение температуры обмотки статора:

$$\theta_{12(\text{средн})} \cong \frac{85 + 112,8}{2} = 98,9^\circ \text{C};$$

$$\theta_{13(\text{средн})} \cong \frac{112,8 + 96,4}{2} = 104,6^\circ \text{C};$$

то есть выше допустимой величины ($\theta_{\text{дон}} = 85^\circ \text{C}$) -- на величину:

- во время второго интервала нагружения -- $\Delta\theta_{12} = 13,9^\circ \text{C}$ (или 16,3 %);
- во время третьего интервала нагружения -- $\Delta\theta_{13} = 19,6^\circ \text{C}$ (или 23,1 %).

Очевидно, что длительная эксплуатация двигателя в таких кратковременных режимах нецелесообразна, т.к. это существенно снизит ресурс изоляции обмотки статора.

Следовательно, необходимо отработать такой способ определения величин мощностей на каждый из ступеней нагрузки, чтобы на любой ступени превышение температуры обмотки статора не выходило за предел допустимой величины.

При нагружении с холодного состояния и постоянной нагрузке (одна ступень) допустимый ток статора в соответствии с [1]:

$$I_{(S2-t)} = I_H \cdot \sqrt{\frac{P_{S2-t} \cdot \sum \Delta P_{S1} - \Delta P_{cm}}{\sum \Delta P_{S1} - \Delta P_{cm}}}; \quad (4)$$

где $\sum \Delta P_{S1}$, ΔP_{cm} -- сумма греющих потерь в двигателе в номинальном режиме S1 и потери в стали соответственно;

P_{S2-t} -- коэффициент допустимого увеличения суммы потерь в двигателе при нагружении с холодного состояния в стандартном режиме S2 с заданной продолжительностью нагружения;

$$P_{S2-t} = \frac{1}{[1 - e^{-t/[T_0 + (T-T_0)(1-e^{-t/T})]}] \cdot (1 + 1,05 \cdot e^{-4t/T})}. \quad (5)$$

Для данного двигателя при $t_{нагр} = 30$ мин величина $P_{S2-30} = 1,48$ и допустимый ток обмотки статора:

$$I_{S2-30} = 9,05 \cdot \sqrt{\frac{1,48 \cdot 731 - 128}{731 - 128}} = 11,39 \text{ А};$$

(на опыте $I_{S2-30} = 11,66$ А при мощности $P_2 = 5,36$ кВт).

Анализ метода расчета мощности (или тока статора) при ступенчатом изменении нагрузки показал, что для того, чтобы превышение температуры не выходило за допустимый предел, необходимо учитывать величину начального нагрева на каждой ступени нагружения. Коэффициент допустимого увеличения потерь на каждой последующей ступени нагружения:

$$P_{i,n+1} = \frac{\theta_{ном} - \theta_{нач,n+1} \cdot e^{-t/T}}{\theta_{ном}} \cdot P_{S2}; \quad (6,a)$$

или более точно

$$P_{i,n+1} = \frac{\theta_{ном} - \theta_{нач,n+1} \cdot e^{-t/[T_0 + (T-T_0)(1-e^{-t/T})]}}{\theta_{ном}} \cdot P_{S2}; \quad (6,b)$$

где $\theta_{нач. n+1}$ -- начальное превышение температуры на $n+1$ ступени нагружения.

В рассмотренном примере на второй ступени нагрузки ($t = 30$ мин) величина, вычитаемая в числителе формулы (6,б), составляет $26,6^\circ C$, тогда:

$$P_{i2} = \frac{85 - 26,6}{85} \cdot P_{S2-30} = 0,687 \cdot 1,48 = 1,02.$$

Подставляя это значение P_{i2} в формулу (4) получим, что практически на данной ступени допустимый ток равен номинальному для режима S1, то есть допустимая мощность для второй ступени составляет $P_{2(2)} = 4$ кВт (вместо 5,36 кВт).

Аналогично для третьей ступени нагружения получаем:

$$P_{i3} = \frac{85 - 49,7}{85} \cdot P_{S2-20} = 0,415 \cdot 1,67 = 0,69;$$

$$I_{1(3)} = 9,05 \cdot \sqrt{\frac{0,69 \cdot 731 - 128}{731 - 128}} = 7,15 \text{ А};$$

что соответствует мощности $P_{2(3)} = 3,16$ кВт (вместо 4 кВт).

Для дальнейшего анализа рассматриваемого вопроса о допустимом уровне нагрузок в кратковременном режиме с многоступенчатым характером изменения мощности на различных интервалах времени были проведены аналогичные расчеты для испытанного восьмиполюсного двигателя ВР132М-8 (в режиме S1: $P_{2H} = 5,5$ кВт; $T_H = 48$ мин; $Da/Di = 23,6/16,2$ см; $I_{1H} = 14,65$ А; изоляция класса В). В часовом режиме допустимая мощность двигателя составила $P_{2(60)} = 6,7$ кВт; в десятиминутном режиме при $\theta_1 = 85^\circ C$ получена мощность $P_{2(10)} = 8,55$ кВт; в тридцатиминутном режиме -- $P_{2(30)} = 7,54$ кВт; для третьей ступени принимаем мощность $P_{2(20)} = 3,7$ кВт.

Расчетная эквивалентная мощность двигателя в режиме со ступенчатым изменением нагрузки по зависимости (1):

$$P_{\text{Э.}(60)} = \sqrt{\frac{8,55^2 \cdot 10 + 7,54^2 \cdot 30 + 3,7^2 \cdot 20}{60}} = 6,75 \text{ кВт};$$

то есть практически соответствует опытным данным -- величине мощности в часовом режиме с холодного состояния при одноступенчатой нагрузке.

Превышения температуры в конце каждого интервала нагружения в соответствии с (3):

- второй интервал $\theta_{1(30\text{мин})} = 117,8^\circ C$;
- третий -- $\theta_{1(20\text{мин})} = 96,7^\circ C$.

Среднее превышение температуры обмотки статора:

- на втором интервале ($t = 30$ мин) -- $\theta_{12cp} = \frac{85 + 117,8}{2} = 101,4^\circ C$;

- на третьем интервале ($t = 20$ мин) -- $\theta_{13cp} = \frac{117,8 + 96,7}{2} = 107,25^\circ C$;

(при допустимом $\theta_1 = 85^\circ C$).

Расчетный ток в кратковременном режиме в соответствии с (4) и (5):

- $I_{S2-30} = 20,41$ А (на опыте 19,63 А); при этом коэффициент $p_{S2-30} = 1,74$;

- $I_{S2-20} = 22,31$ А; при этом $p_{S2-20} = 2,04$.

Коэффициент допустимого увеличения потерь в двигателе на второй и третьей ступенях нагружения по(6,б):

$$p_{i2} = \frac{85 - 40,1}{85} \cdot 1,74 = 0,92 ;$$

$$p_{i3} = \frac{85 - 69,7}{85} \cdot 2,04 = 0,368 ;$$

и, соответственно, допустимые токи и мощности:

- на второй ступени $I_{i2} = 13,9$ А; $P_2 \cong 5,2$ кВт (вместо 7,54 кВт);

- на третьей ступени $I_{i3} = 6,5$ А – меньше тока холостого хода $I_{xx} = 9,2$ А;

значит третья ступень нагружения неприемлема при $\theta_1 = 85^\circ C$.

Значит, если простой оценочный расчёт нагрева по (2) или (3) показывает, что на какой-либо ступени температура будет выше допустимого уровня для изоляции обмотки статора, то для обеспечения надежной работы двигателя необходимо определять мощности ступеней по формулам (4)-(6).

При этом в случае, если получаемые величины мощностей на различных участках не соответствуют условиям эксплуатации (ниже требуемых), то нужно брать двигатель с большей номинальной мощностью в стандартном режиме (S1 или S2) и повторять расчет.

Предложенный способ определения допустимых мощностей на различных ступенях нагружения приемлем и при других разных соотношениях мощностей ступеней.

Например, если для двигателя В100L-4 на первой ступени на интервале времени $\Delta t_1 = 10$ мин будет мощность $P_{2(10)} = 4$ кВт, то превышение температуры обмотки статора за это время достигнет $\theta_{1(10)} = 32^\circ C$; тогда на второй ступени с длительностью нагружения $\Delta t_2 = 30$:

- коэффициент

$$P_{2i(30)} = \frac{\theta_{ном} - \theta_{нач.2} \cdot e^{-\Delta t_2 / [T_0 + (T - T_0) \cdot (1 - e^{-\Delta t_2 / T})]}}{\theta_{ном}} \cdot P_{S2-30} =$$

$$= \frac{85 - 32 \cdot 0,31}{85} \cdot 1,48 = 1,3 ;$$

- допустимый ток

$$I_{2i(30)} = 9,05 \cdot \sqrt{\frac{1,3 \cdot 731 - 128}{731 - 128}} = 10,6 \text{ А};$$

что соответствует мощности $P_{2i(30)} = 4,68$ кВт;

Аналогично определяется допустимая мощность на третьей ступени нагружения.

Вывод. Разработан способ определения допустимой мощности в кратковременном режиме на каждой из ступеней многоступенчатого графика изменения нагрузки при условии нагрева обмотки статора в допустимых пределах для данного класса нагревостойкости изоляции.

Список литературы

1. Бурковский А. Н., Титкова Т.О., Канашенкова Т.П., Макеев В.В. Определение допустимого тока статора взрывозащищенных асинхронных двигателей серии В, ВР в кратковременных режимах работы. Электротехническая промышленность. Серия “Электрические машины”. Вып. 7(89). 1978г. – с.5-7.
2. Бурковский А. Н. Определение полезной мощности обдуваемых взрывозащищенных асинхронных двигателей в нестандартных кратковременных режимах. Взрывозащищенное Электрооборудование: Сборник научных трудов УкрНИИВЭ.—Донецк, 1999.—С. 30-33.
3. Справочник по автоматизированному электроприводу. Под ред. Елисеева В.А. и Шинянского А.В. М.: Энергоатомиздат. 1983.—616 с.