

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЕМКОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В процессе работы асинхронного электродвигателя имеют место потери, которые практически полностью (за исключением потерь на вентиляцию) преобразуются в тепло. Это приводит к повышению температуры всех узлов электродвигателя. В идеальном случае (для однородного тела) справедлив баланс энергии, при котором часть образующейся в единицу времени  $\Delta t$  тепловой энергии накапливается в этом теле, а другая часть отводится в окружающую среду за счет возникающей разности температур [1]. Это определяется выражением

$$P_V \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot \Delta \theta + \alpha \cdot A \cdot \Delta \theta \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где:  $c$  - удельная тепловая емкость;  $m$  - масса тела;  $\Delta \theta$  - разность температур тела и окружающей среды;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи тела;  $A$  - площадь поверхности охлаждения тела.

Во времени это описывается дифференциальным уравнением вида  $P_V = c \cdot m \cdot d\theta/dt + \alpha \cdot A \cdot \Delta \theta$ , решение которого представляется экспоненциальной функцией

$$\Delta \theta = \Delta \theta_{\max} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_E}} \right),$$

где  $\Delta \theta_{\max} = \frac{P_V}{\alpha \cdot A}$  - максимальное превышение температуры тела над температурой окружающей (охлаждающей) среды;  $T_E = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot A} = C_{th} \cdot R_{th}$  - постоянная времени нагрева;  $C_{th}$  - тепловая емкость тела;  $R_{th}$  - тепло-

вое сопротивление между телом и окружающей (охлаждающей) средой.

В начальный период нагрева, в так называемой субтранзиентной временной области ( $t \approx 0$ ) температура тела равна температуре окружающей среды. Поэтому вся тепловая энергия, вызываемая потерями, расходуется на нагрев тела со скоростью нагрева, пропорционально тепловой емкости  $C_{th}$ . При наступлении теплового баланса (приток и отток тепла равны) повышение температуры тела прекращается и вся тепловая энергия через тепловое сопротивление  $R_{th}$  будет рассеиваться в окружающую среду.

Такой подход справедлив для оценки теплового состояния электродвигателя только при его одномассовой модели. На практике источников потерь в двигателе несколько, и его отдельные узлы прогреваются с различной скоростью, причем имеет место их взаимное тепловое влияние друг на друга. Теоретические расчеты величин тепловых емкостей узлов двигателя несомненно представляют интерес с научной точки зрения. Однако для их расчета необходимо знание параметров машины, которые не всегда доступны пользователю. Кроме того имеет место изменение параметров двигателя во время эксплуатации или в результате проводимых ремонтов.

Целью настоящей работы является разработка методики экспериментального определения тепловых емкостей основных узлов асинхронного электродвигателя путем непосредственных измерений на двигателе.

Составим уравнение для потерь мощности асинхронного двигателя.

$$P_V = P_1 - P_2 = P_{1Cu} + P_{Fe} + P_{2Cu} + P_{vн} \quad (2)$$

Оно показывает, что основными потерями, греющими электродвигатель, являются потери в обмотке статора  $P_{1Cu}$ , потери в магнитопроводе статора  $P_{Fe}$  и потери в роторе ( $P_{2Cu} + P_{vн}$ ), причем механические потери  $P_{vн}$  нагруженного двигателя не оказывают существенного влияния на его нагрев.

Для оценки теплового состояния электродвигателя можно воспользоваться трехмассовой эквивалентной тепловой схемой замещения, которая с достаточной для практики степенью точности позволяет анализировать изменение теплового состояния его основных узлов.

В работе [2] проведен анализ трехмассовой модели (рис.1а) четырехполюсного асинхронного двигателя мощностью 2,2 кВт с высотой оси 100 мм и экспериментально определены величины тепловых сопротивлений. При этом двигатель нагружался постоянной номинальной нагрузкой, а величины сопротивлений определялись через температуры и потери после установления теплового баланса в измеряемом узле. Полученные результаты могут быть использованы для оценки теплового состояния электродвигателя в статическом режиме работы и не позволяют отслеживать динамические изменения температуры в отдельных его узлах в процессе нагрева или охлаждения двигателя, или при изменениях нагрузки.

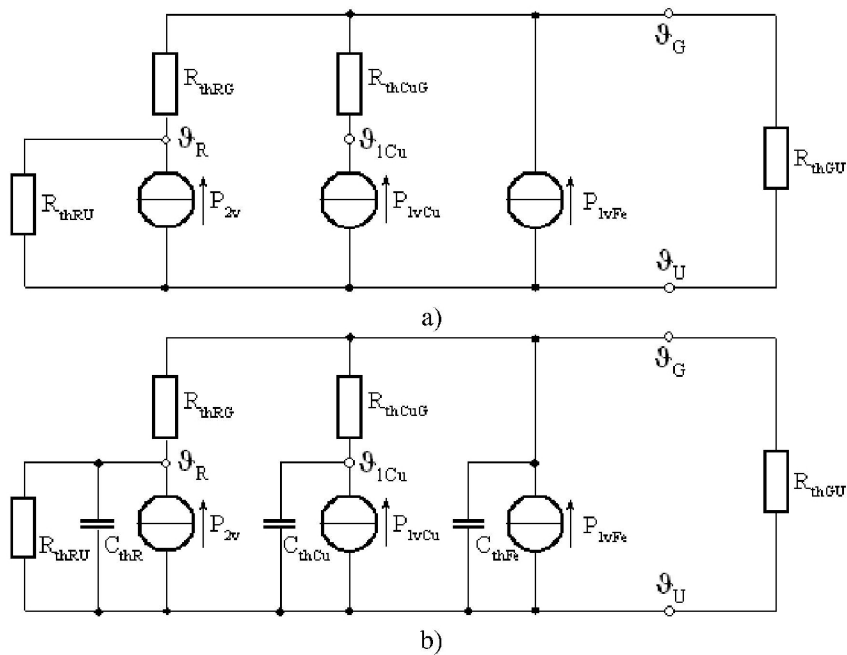


Рис.1. Трехмассовая тепловая модель электродвигателя.

Таким образом, определению подлежат тепловые емкости обмотки статора  $C_{thCu}$ , магнитопровода статора  $C_{thFe}$  и ротора  $C_{thR}$ , которые пропорциональны соответствующим потерям  $P_{lvCu}$ ,  $P_{lvFe}$ ,  $P_{2v}$ . В качестве примера более подробно опишем методику определения тепловой емкости обмотки статора.

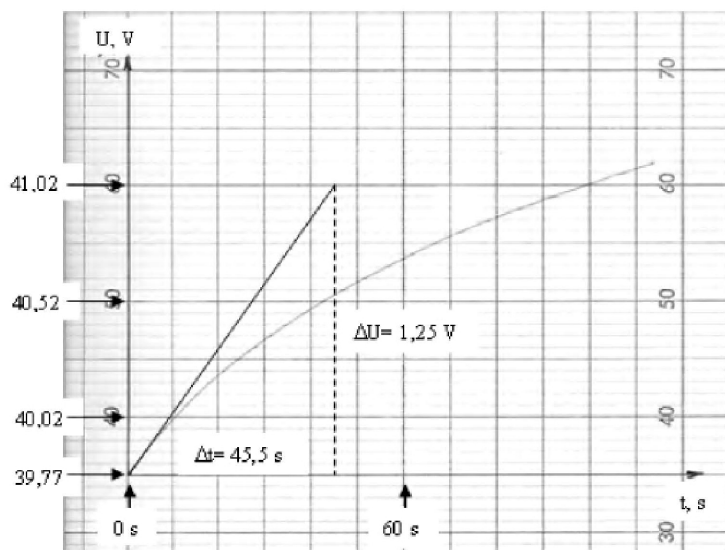


Рис.2. Кривая изменения напряжения

Если дополнить полученную трехмассовую эквивалентную тепловую схему замещения тепловыми емкостями (рис.1b), включенными параллельно источникам тепловых потерь, то появится возможность проводить оценку теплового состояния электродвигателя не только в статическом режиме работы, но и в процессе нагрева или охлаждения, или при изменениях нагрузки. Основная проблема заключается в необходимости отдельного экспериментального определения величин тепловых емкостей, без учета взаимного влияния прогреваемых узлов двигателя друг на друга.

Для начала соединим последовательно фазовые обмотки статора и измерим их сопротивление  $R_0$  при температуре окружающей среды  $\theta_0$ . Затем подключим их к источнику постоянного тока, установив величину ограничения тока  $I$ , примерно равную номинальному току двигателя. При протекании тока обмотка нагревается, сопротивление меди увеличивается, что приводит к возрастанию на ней падения напряжения относительно начального значения при  $\theta_0$ . Кривую изменения напряжения регистрируем с помощью 2-х координатного самописца (рис.2). Проведя касательную к кривой в точке  $t = 0$ , где вся тепловая энергия, вызываемая потерями, расходуется на нагрев обмотки статора и еще не происходит теплообмен с соседними узлами, определяем величины  $U_0, U_1, \Delta U$  и  $\Delta t$ .

Используя известные соотношения  $R_0 = \frac{U_0}{I}$ ,  $R_1 = \frac{U_1}{I}$ ,  $\theta_1 = \frac{R_1}{R_0}(235K + \theta_0) - 235K$ , определим величину тепловой емкости обмотки статора по формуле:

$$C_{thCu} = \frac{P_{vCu}}{\Delta\theta / \Delta t} = \frac{P_{vCu} \cdot \Delta t}{\theta_1 - \theta_0} = \frac{3 \cdot R_0 \cdot I^2 \cdot \Delta t}{\left(\frac{U_1}{U_0} - 1\right) \cdot (235 + \theta_0)} = \frac{9,943 \cdot 4^2 \cdot 45,5}{\left(\frac{41,02}{39,97} - 1\right) \cdot (235 + 19)} = 906,7 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Для определения тепловой емкости магнитопровода статора уравнение баланса мощностей (2) было приведено к виду:

$$P_{Fe} = P_{I0} - P_{Cu} - \frac{P_{vn}}{1-s} = P_{I0} - 3 \cdot R \cdot I^2 - \frac{P_{vn}}{1-s} \quad (3)$$

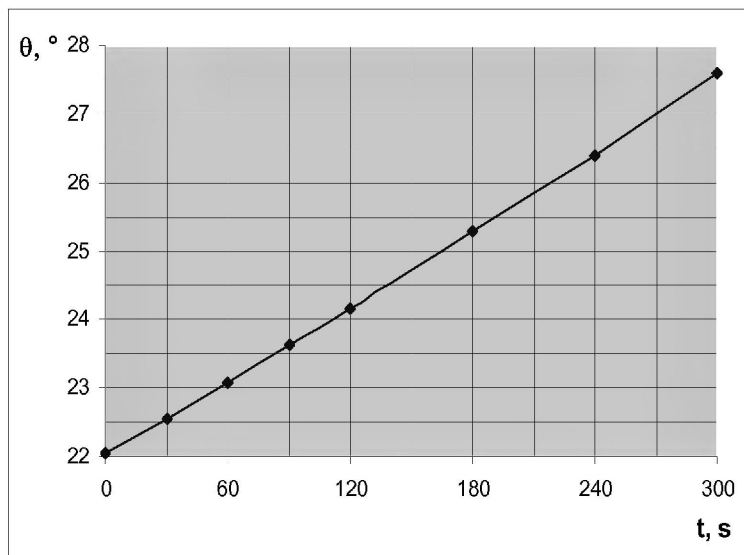


Рис.3. Кривая нагрева магнитопровода статора

Измерения показали, что изменение температуры во временном интервале  $\Delta t = 0 - 300$  с. составило  $\Delta \theta = 5,5^\circ$  и носит сравнительно линейный характер (рис.3). Поэтому для определения потерь можно использовать среднее значение тока холостого хода во всех трех фазах и суммы средних значений сопротивлений обмоток (фаз) статора, измеренных и/или рассчитанных при  $t = 0$  и  $t = 300$  с.

Расчет потерь в магнитопроводе дал следующий результат:

$$P_{Fe} = P_{I0} - P_{Cu} - \frac{P_{vn}}{1-s} = P_{I0} - 3 \cdot R \cdot I^2 - \frac{P_{vn}}{1-s} = 248,05 - 3 \cdot 10,563 \cdot 2,75^2 - \frac{104}{1 - \frac{1500-1496}{1500}} = 63 \text{ Вт}$$

При этом величина тепловой емкости магнитопровода статора составила:

$$C_{thFe} = \frac{P_{Fe}}{\Delta \theta / \Delta t} = \frac{63,89 \cdot 300}{5,5} = 3484,9 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Определение тепловой емкости ротора производилось путем определения потерь в роторе ( $P_{2Cu}$ ) в режиме короткого замыкания при номинальном токе, с учетом уже известных нам величин  $P_{ICu}$  и  $P_{Fe}$ .

$$P_R = P_{2Cu} = P_{I0} - P_{Fe} - P_{ICu} \quad (4)$$

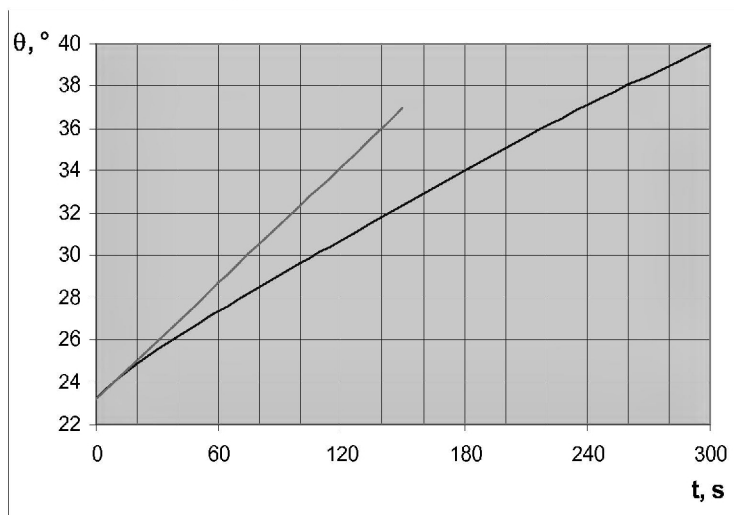


Рис.4. Кривая нагрева алюминия ротора

$$C_{thR} = C_{th2Cu} = \frac{P_R}{\Delta \theta / \Delta t} = \frac{(378 - 63,9 - 215,5) \cdot 140}{12,8} = 1078,4 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Предварительно были определены механические потери  $P_{vn}$ . Для этого вращали обесточенный испытуемый двигатель с помощью дополнительного привода и регистрировали число оборотов и крутящий момент между их валами. Полученный для номинальной частоты вращения результат (104 Вт) учли в выражении (3) при определении потерь.

Для определения потерь в магнитопроводе статора использовались измерения в режиме холостого хода. Отсчет показаний проводился через каждые 30 секунд в течении 5 минут. Регистрировались напряжения и токи во всех трех фазах, потребляемая электрическая мощность  $P_{I0}$ , число оборотов и температура магнитопровода с помощью термоэлемента, установленного в засверленном на половину толщины статора отверстии.

Температура ротора контролировалась на алюминиевом короткозамкнутом кольце беличьей клетки с помощью инфракрасного регистратора температуры через отверстие в крышке подшипника. Показания температуры ротора регистрировались с интервалом 10 сек. в течении 5 минут. Кривая нагрева приведена на рис 4. Кроме того, регистрировались напряжения и токи во всех трех фазах, а также потребляемая электрическая мощность  $P_{I0}$ . Проведя касательную к кривой в точке  $t = 0$ , где вся тепловая энергия, вызываемая потерями, расходуется на нагрев алюминия ротора, и еще не происходит теплообмен с железом и валом ротора, определяем величины  $\Delta \theta (36-23,2)^\circ$  и  $\Delta t (140-0)$ с, по которым рассчитываем величину тепловой емкости ротора:

В таблице 1 приведены полученные экспериментальным путем значения тепловых сопротивлений и тепловых емкостей асинхронного четырехфазного электродвигателя с высотой оси 100 мм согласно приведенной на рис. 1b трехмассовой эквивалентной тепловой схеме замещения.

Таблица 1. Значения тепловых сопротивлений и емкостей АД

$R_{thRU}$	$R_{thRG}$	$R_{thCuG}$	$R_{thGU}$	$C_{thR}$	$C_{thCu}$	$C_{thFe}$
0,45 К/Вт	0,7 К/Вт	0,11 К/Вт	0,1 К/Вт	1078 Дж/К	907 Дж/К	3485 Дж/К

Данные по тепловым сопротивлениям взяты из работы [2].

Выводы:

1. Показано, что для отдельного определения тепловых емкостей основных узлов электродвигателя экспериментальным путем необходимо использовать т.н. субтранзитную временную область ( $t \approx 0$ ), в которой вся тепловая энергия, вызываемая потерями в узле, расходуется на его нагрев со скоростью, пропорциональной тепловой емкости  $C_{th}$  и где еще практически не происходит теплового обмена с соседними узлами.

2. Полученная трехмассовая эквивалентная тепловая схема замещения может быть использована для моделирования и тепловой оценки поведения асинхронного электродвигателя в статическом и динамическом (пуск, торможение, изменение нагрузки) режимах работы как на стадии проектирования систем электропривода, так и в процессе их повседневной работы.

Список литературы:

- [1] Rolf Fischer. Elektrische Maschinen. 12 Auflage. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004.
- [2] S. Khudoliy, N. Neuberger, E. Nolle. Rotorerwärmung bei Umrichter gespeisten Asynchronmaschinen. Spektrum-Zeitschrift der HS-Esslingen, 26/2007