

УДК: 621.31

В.В. Кузнецов, канд. техн. наук

(Украина, Днепрпетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

СИНТЕЗ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В СЕТИ С НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

Актуальность работы

Негативное влияние некачественного питающего напряжения на показатели электромеханических систем хорошо известно [1,2]. Низкое качество электроэнергии в цехах промышленных предприятий обуславливает рост прямых производственных затрат вследствие увеличения объемов ее потребления. Помимо этого, возрастают и косвенные затраты, связанные с сокращением сроков службы электрических машин. Как известно, последние определяются, главным образом, температурным состоянием асинхронного двигателя (АД) [1]. Наиболее чувствительным к нагреву элементом двигателя является изоляция обмоток. Даже при незначительном превышении ее температуры допустимого значения, ускоряются процессы старения, повышается вероятность электрического пробоя.

Материал и результаты исследований

Для исследования влияния режимов работы электродвигателя на его температурное состояние применяются т.н. тепловые модели [2,3]. Они представляют собой схему замещения, источниками тепла в которой служат электрические потери, в узлах находятся температуры конструктивных элементов, а между ними лежат соответствующие тепловые проводимости и емкости. Рассматриваемые модели имеют разную степень детализации. Наиболее простой является одномассовая модель, в которой электромеханический преобразователь представляется как единое однородное тело с общей температурой. Хотя в действительности присутствует неоднородность распределения температур: температура изоляции обмотки статора АД может превышать температуру корпуса на 15-20°C [4].

Более детальные модели имеют меньшую погрешность прогноза, однако для этого необходимы дополнительные данные о тепловых проводимостях и емкостях отдельных конструктивных элементов двигателя. Такие модели применяются, как правило, только на стадии проектирования. Кроме того, при использовании последних рассматривается установившееся тепловое состояние без учета его динамики.

На наш взгляд, в условиях эксплуатации наиболее целесообразно использование одномассовой динамической тепловой модели, причем в качестве ее выходного параметра необходимо рассматривать температуру критического по нагреву элемента АД – лобовых частей обмоток статора. Как известно, они находятся в наихудших по охлаждению условиях, поскольку их теплоотдача, главным образом, осуществляется через воздух.

Одномассовая динамическая тепловая модель АД описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\Delta P = A \cdot \tau + \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot C, \quad (1)$$

где ΔP – мощность греющих потерь, выделяющихся в электродвигателе; τ – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды; $\Delta \tau$ – приращение температуры двигателя, произошедшее за время Δt ; A – коэффициент теплоотдачи, Дж/(сек·С) (равен количеству тепла, отдаваемому в окружающую среду за 1 секунду при разнице указанных температур $\tau = 1$ °С); C – теплоемкость двигателя, Дж/°С. Указанная теплоемкость равна количеству тепла, необходимого для нагрева АД на 1 °С при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Как видно, в уравнении теплового баланса (1) имеются две неизвестные величины – A и C , которые могут быть найдены по экспериментальным данным путем составления системы уравнений относительно неизвестных. При этом повышение точности определения коэффициента теплоотдачи и теплоемкости двигателя достигается за счет использования сумм измеренных параметров в нескольких опытах:

$$\begin{cases} \frac{\sum \Delta P}{N} = A \cdot \sum \tau + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot C \\ \frac{\sum \Delta P \cdot \tau}{N} = A \cdot \sum \tau^2 + \sum \frac{\Delta \tau}{\Delta t} \cdot \tau \cdot C \end{cases} \quad (2)$$

Соответствующие эксперименты проведены в условиях лаборатории электромеханических систем кафедры энергетического менеджмента Запорожской государственной инженерной академии. В качестве исследуемого рассмотрен асинхронный двигатель типа 4АХ80А4У3 (номинальные параметры: $U_H=220/380$ В (Δ/Y), $P_H=1,1$ кВт, $n_H=1400$ об/мин, $I_H=4,8/2,8$ А, $\eta=75\%$, $\cos \varphi=0,81$). Двигатель нагружен на генератор постоянного тока типа ПЗ1У4 (номинальные параметры $U_H=230$ В, $P_H=1,0$ кВт, $n_H=1450$ об/мин, $I_H=4,3$ А, $\eta=75\%$). В процессе опытов АД нагревался при работе под номинальной нагрузкой, а остывал при невращающемся роторе.

В крышке двигателя было сделано отверстие для определения температуры лобовых частей обмоток с помощью лазерного пирометра типа Fluke 568. Токи и напряжения регистрировались с помощью мобильного измерительно-диагностического комплекса на базе датчиков тока типа LA 25А, датчиков напряжения – LV100Р (производство фирмы LEM, Швейцария) и АЦП Е-440 (L-CARD, Россия). Одна из полученных в результате кривая нагрева исследуемого двигателя приведена в качестве примера на Рис. 1. Как видно установившееся значение температуры двигателя ($76,3^\circ\text{C}$) достигается за 62 минуты.

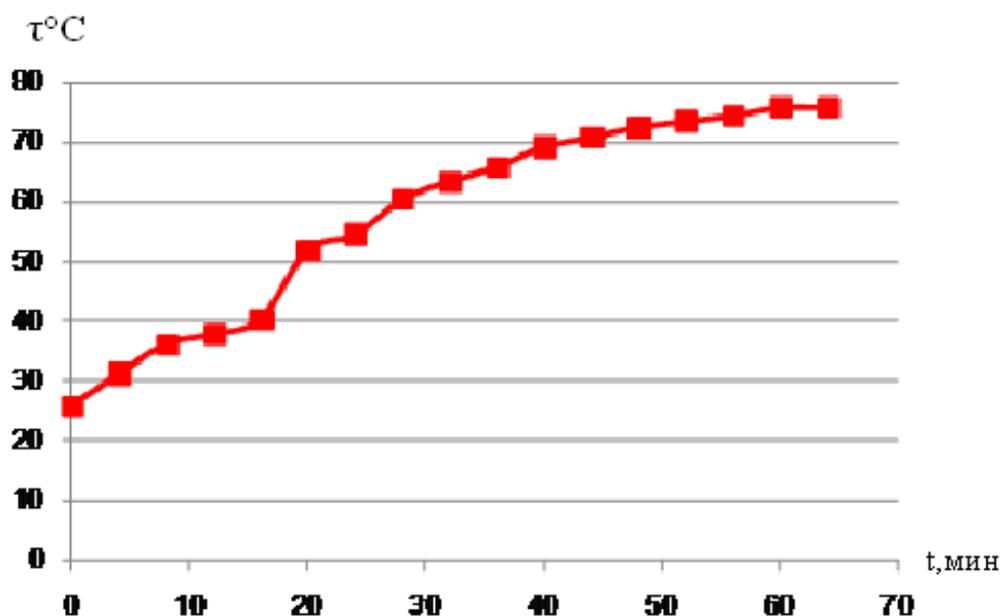


Рис. 1. Кривая нагрева АД при работе под номинальной нагрузкой с идеальным питанием

По результатам опытов составлена система уравнений (2) и произведен расчет параметров однофазной тепловой модели. Расчетные значения величин составили: коэффициент теплоотдачи двигателя – $A=11,2$ Дж/(сек \times °C), теплоемкость электродвигателя $C=12,1$ кДж/°C. Учитывая, что в справочной литературе имеются крайне скудные данные о тепловых параметрах электрических машин (как правило, приводятся только тепловые постоянные времени для двигателей отдельных классов и диапазонов мощностей) рассмотренный способ их определения в процессе идентификации модели конкретного АД является достаточно актуальным.

Последующие опыты проведены при различной степени искажения питания электродвигателя. Показатели качества последнего (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения k_U , коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ε_2) приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Показатели качества электроэнергии в опытах и установившееся значение температуры обмотки АД

№ опыта	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения k_U , %	Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности ε_2 , %	Установившаяся абсолютная температура, $^\circ\text{C}$
1	0	0	76,3
2	0	4	85,1
3	8	0	92,5
4	13,0	0	117,8

Опыт №4 соответствует работе двигателя с температурой, превышающей допустимую для данного класса изоляции $F(105^{\circ}\text{C})$ и нахождение АД в таком состоянии может быть только кратковременным, т.к. возможен тепловой пробой его обмоток. Вид фазных напряжений, соответствующий этому максимальному искажению показан на рис. 2.

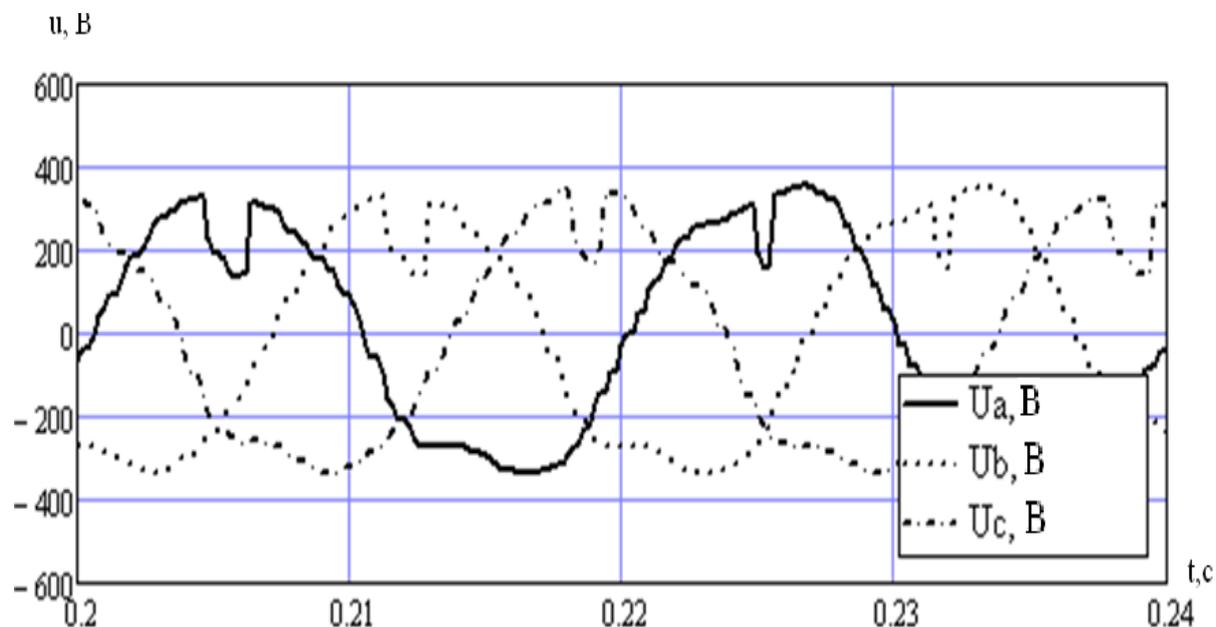


Рис. 2. Фазные напряжения в опыте № 4

В качестве примера на Рис. 3 представлен график превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды ($25,7^{\circ}\text{C}$) в опыте нагрева. Кроме того, показана расчетная кривая температуры, полученная с помощью последовательного совмещения электромеханической модели асинхронного двигателя [5] и его тепловой модели [6]. Здесь величина потерь на выходе первой из них служит входным параметром второй, на выходе которой и получается значение рассматриваемого превышения температуры электродвигателя.

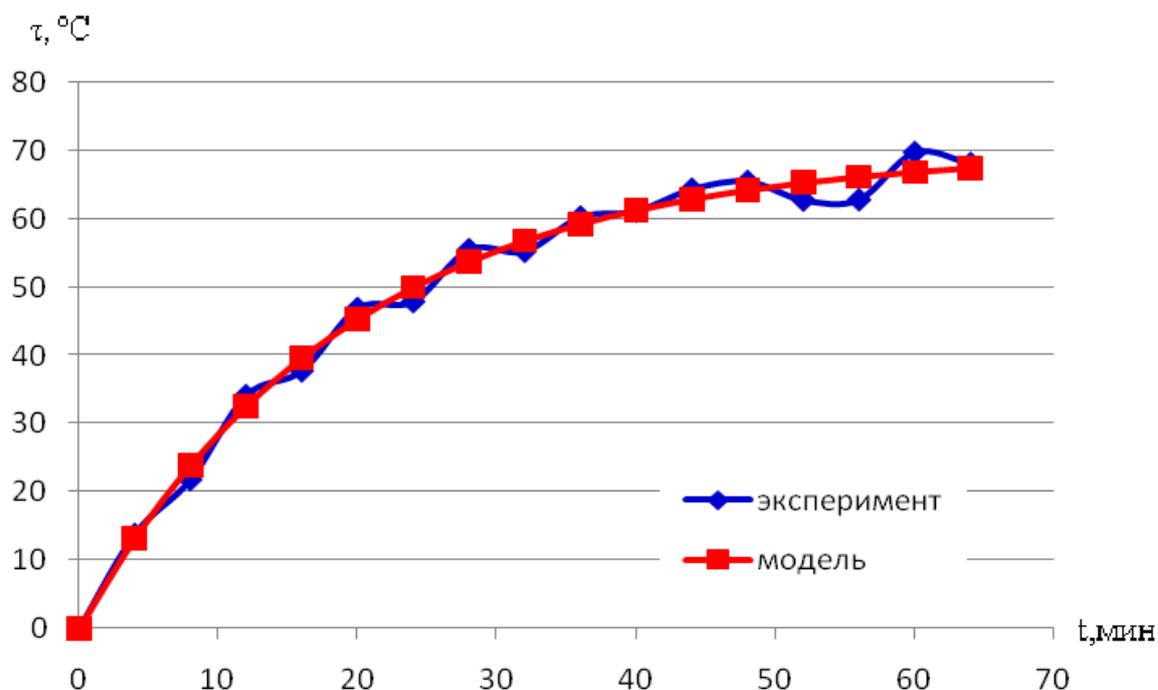


Рис. 3. Кривые нагрева двигателя в опыте №3 ($k_U = 8\%$, $\varepsilon_2 = 0\%$).

Далее был произведен расчет погрешности прогнозируемого значения температуры в динамике нагрева. На Рис. 4 показаны экспериментальные и расчетные (прогнозируемые) значения температуры для всех проведенных опытов, которые и использовались для проверки адекватности модели по методу, изложенному в [7]. Здесь различный формат маркеров относится к соответствующим опытам.

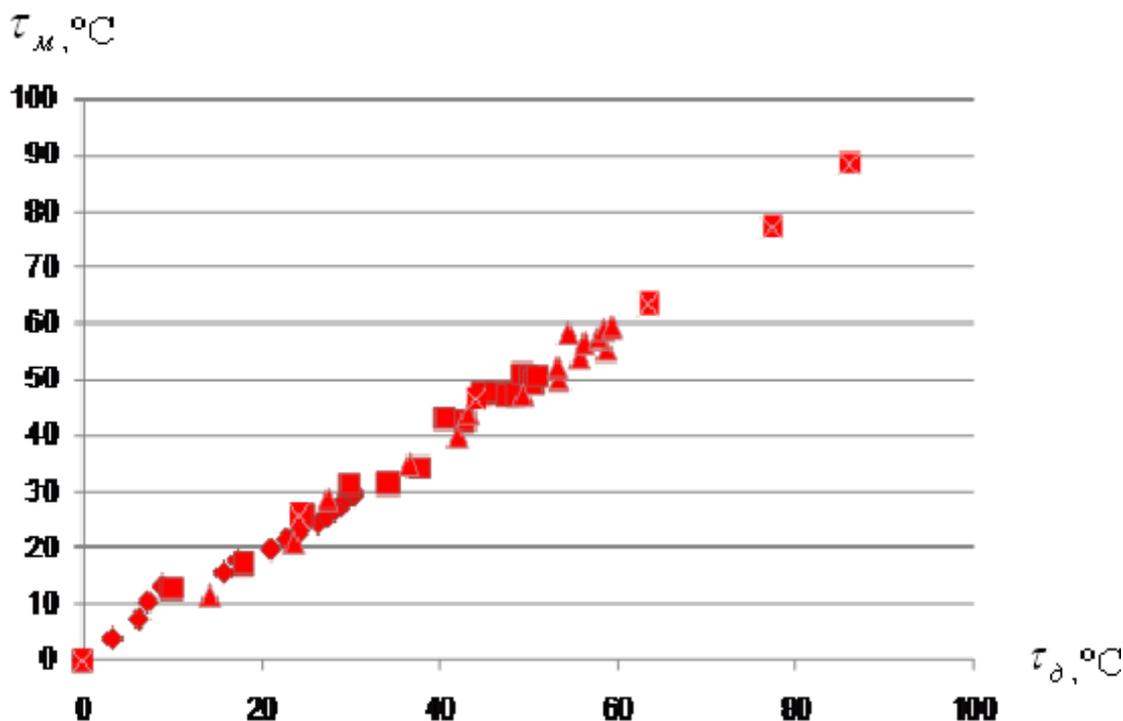


Рис. 4. Взаимосвязь прогнозируемых τ_m и экспериментальных τ_d значений превышения температуры обмотки АД

Проведенная проверка адекватности предполагает получение следующего уравнения линейной регрессии

$$Y_n^* = a_0 + a_1 Y_d \quad (3)$$

где $a_0 = \bar{Y}_n - r_{Y_d Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_d} \bar{Y}_d$; $a_1 = r_{Y_d Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_d}$. (4)

Здесь \bar{Y}_n, \bar{Y}_d – средние значения прогнозируемых и действительных величин; $r_{Y_d Y_n}$ – коэффициент корреляции между ними; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_d}$ – среднеквадратичные отклонения.

Указанные параметры вычислялись по формулам:

$$r_{Y_d Y_n} = \frac{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)(Y_n - \bar{Y}_n)}{L \sigma_{Y_d} \sigma_{Y_n}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{Y_d} = \sqrt{\sum_1^L (Y_d - \bar{Y}_d)^2 / (L-1)}, \quad (6)$$

$$\sigma_{Y_n} = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)}, \quad (7)$$

где $L=57$ объем статистической выборки (количество замеров температуры во всех опытах).

Среднеквадратическая абсолютная ошибка измерений определялась как:

$$\Delta Y_n = t_p \sigma_{Y_n}^* , \quad (8)$$

где t_p – коэффициент Стьюдента для заданной надежности и числа степеней свободы $k = L - 1$. В рассматриваемом случае надежность принималась $p = 0,05$. Здесь $\sigma_{Y_n}^*$ – остаточное среднеквадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

$$\sigma_{Y_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (Y_n - \bar{Y}_n)^2 / (L-1)} . \quad (9)$$

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

$$\delta_{Y_n} = |\Delta Y_n| / Y_{nmax} 100\% , \quad (10)$$

где Y_{nmax} – наибольшее значение прогнозируемой величины.

Полученные в результате значения: $\sigma_{Y_d} = 21,2^\circ\text{C}$, $\sigma_{Y_n} = 20,9^\circ\text{C}$, $r_{Y_d Y_n} = 0,99$, $\sigma_{Y_n}^* = 2,34^\circ\text{C}$, $\Delta Y_n = 0,28^\circ\text{C}$, $\delta_{Y_n} = 3,2\%$.

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной тепловой модели АД, работающего в сетях с некачественной электрической энергией. Учитывая, что для многих типов двигателей в справочной литературе отсутствуют сведения о коэффициентах теплоотдачи и теплоемкости, а по отдельным приводятся только тепловые постоянные времени, значения указанных параметров модели могут быть получены по использованной в статье методике.

Список литературы

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, – 2000. – 340 с.
2. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Проектирование электрических машин. /Под ред. И.П.Копылова – М.: Энергия, 1980
4. Рыжков А. А. Определение параметров тепловой схемы замещения асинхронного двигателя на базе экспериментальных данных/ Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика: сб. науч. тр. Днепродзерж. гос. техн. ун-та (техн. науки): темат. вып. – Дн-жнск.: 2007. – 156 с.
5. Качан Ю.Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания / Ю.Г. Качан А.В.Николенко, В.В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного. університету. – 2009. – №3.– С.56-58.
6. Качан Ю.Г. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С.9 – 16
7. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Е. Корн. – М.: Наука, 1984.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Качаном Ю.Г.