

**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 одностепенная 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 одностепенной 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.

Одностепенная динамическая тепловая модель АД описывается следующим дифференциальным уравнением:

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

где  $\Delta P$  – мощность греющих потерь, выделяющихся в электродвигателе;  $\tau$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды;  $\Delta \tau$  – приращение температуры двигателя, произошедшее за время  $\Delta t$ ;  $A$  – 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 ( $\Delta/Y$ ),  $P_H=1,1$  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.

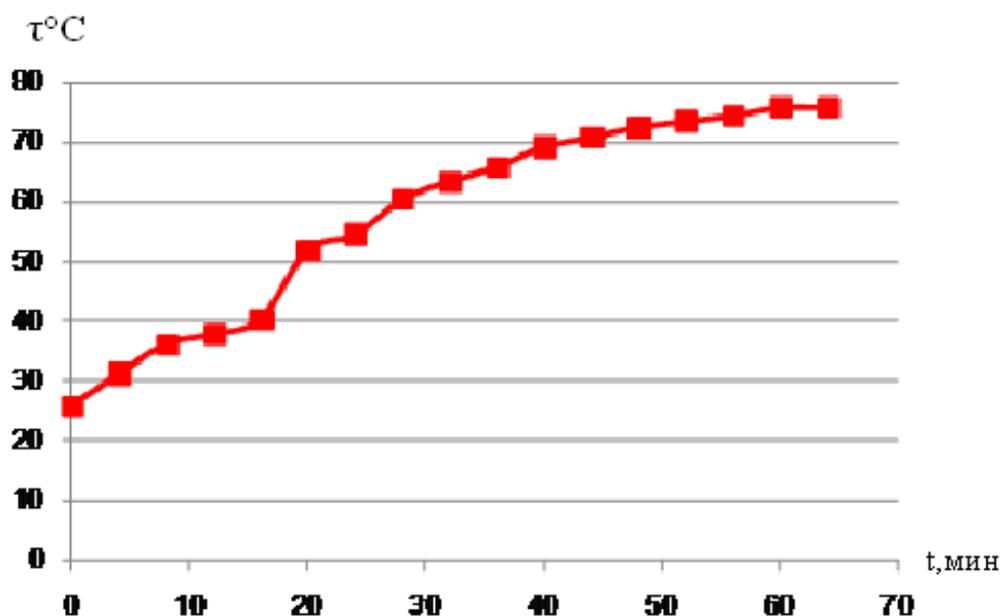


Рис. 1. Кривая нагрева АД при работе под номинальной нагрузкой с идеальным питанием

По результатам опытов составлена система уравнений (2) и произведен расчет параметров однофазовой 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  $\varepsilon_2$ ) 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 $\varepsilon_2$ , %	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.

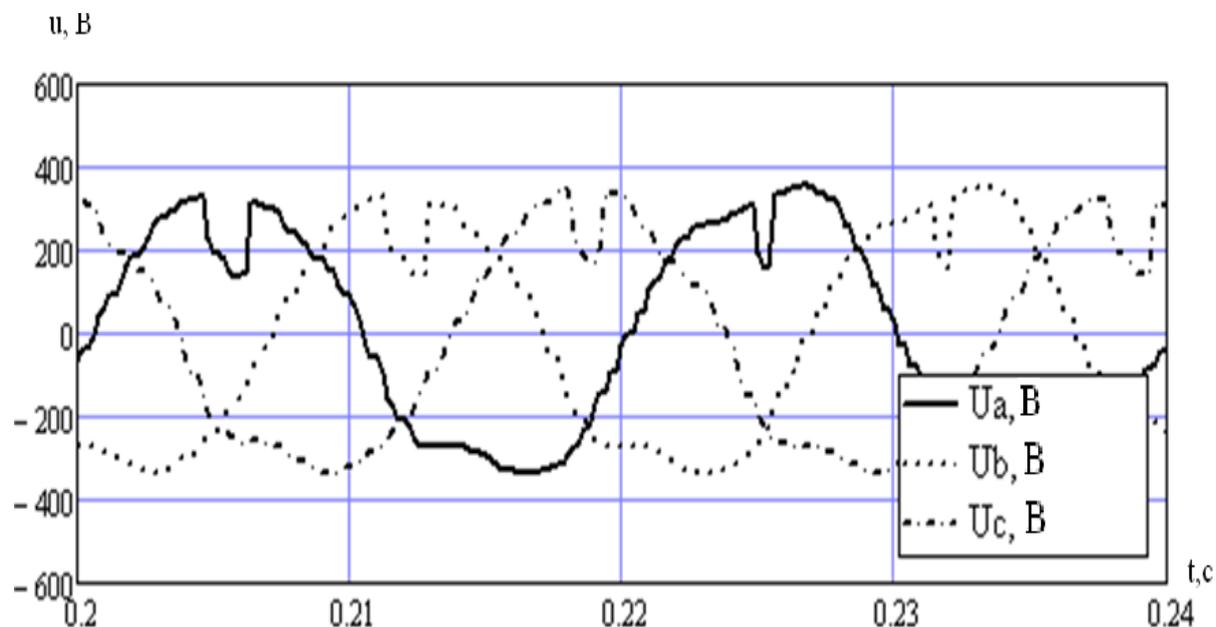


Рис. 2. Фазные напряжения в опыте № 4

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.

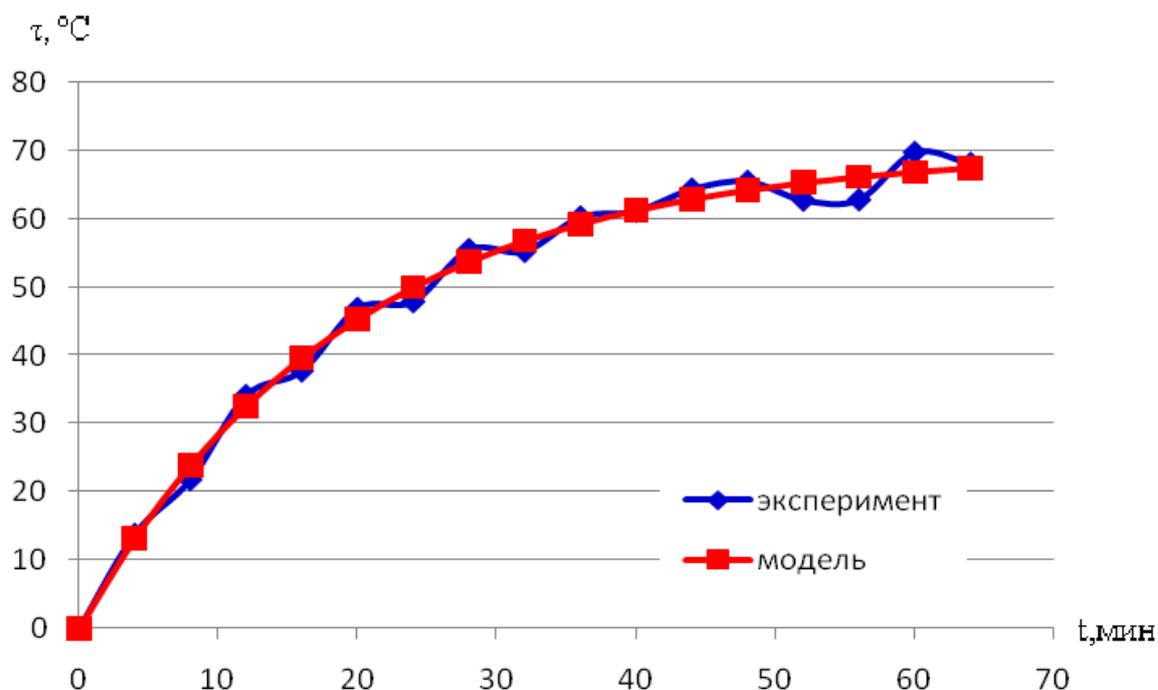
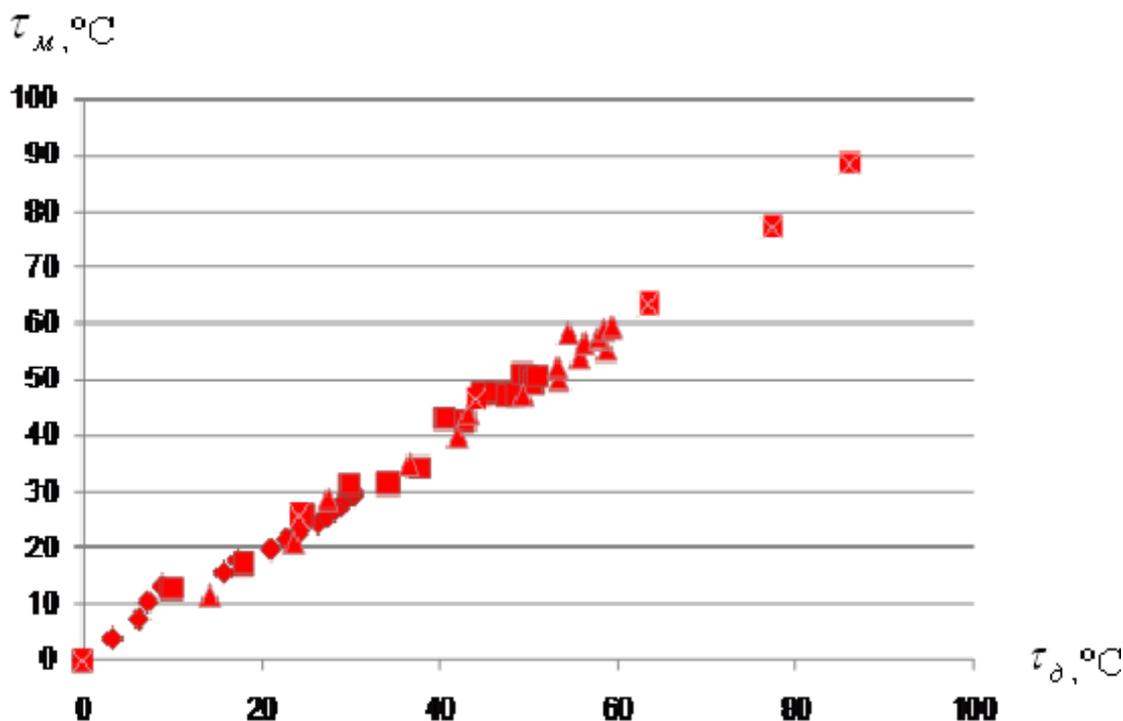


Рис. 3. Кривые нагрева двигателя в опыте №3 ( $k_U = 8\%$ ,  $\varepsilon_2 = 0\%$ ).

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  $\tau_m$  и экспериментальных  $\tau_d$  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 среднее квадратичное отклонение, вычисляемое по формуле:

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

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.*

UDC 622-625.28-83

**V. Chornaja, M. Khankyshyieva, V. Chornij**  
(Ukraine, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University)

## **JUSTIFICATION FOR THE REQUESTED OF A PARAMETERS MONITORING SYSTEM FOR TRACTION ELECTRIC DRIVE OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES**

As experience in the operation of the traction rolling stock of domestic iron ore mines, transients (about 60 %) occupied most of the time functioning, which is connected with the peculiarities of doing work on the extraction of iron ore and adversely affects the reliability of the constituent elements, and especially on traction motors (TM). Emergencies often take place during operation of the traction unit in underground mines it can occur in the circuit, switching equipment, converter, traction engines (fig. 1). Emergency situation can be caused