

В. В. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Днепропетровск

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

Статья посвящена оценке адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии, выполненной по результатам промышленного эксперимента. Описана методика проведения эксперимента. Рассчитаны среднеквадратические абсолютные и относительные ошибки прогноза. Для определения параметров динамической тепловой модели выполнено нагрев электромеханического преобразователя под нагрузкой и измерена температура обмотки последнего в этом замере и при его остывании в выключенном состоянии.

Ключевые слова: одномассовая тепловая динамическая модель, асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии, напряжение.

Введение. К настоящему времени накоплен богатый опыт в области исследования влияния качества электроэнергии на работу асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором [1–5]. 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 [6], нормативный срок эксплуатации общепромышленных асинхронных двигателей составляет порядка десяти лет. Однако это соответствует только тем случаям, когда соблюдаются определенные условия. Главным из них является соответствие теплового режима электрической машины классу используемой изоляции. Снижение качества электроэнергии приводит к росту греющих потерь и, соответственно температуры изоляции. Это, в сочетании с перегрузками, приводит к существенному сокращению срока службы электродвигателей. Практика показывает, что для 40% общепромышленных АД номинальным напряжением 0,4 кВ последний составляет 1,25-2 года [7].

Цель работы. Целью работы является проверка адекватности тепловой динамической модели асинхронного двигателя, работающего в сети с некачественной электроэнергией.

Материал и результаты исследований. Для исследования влияния режимов работы электродвигателя на его температурное состояние применяются т. н. тепловые модели [8,9]. 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 [10].

© В. В. КУЗНЕЦОВ, 2014

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 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 $\tau = 1^\circ\text{C}$); C – теплоемкость двигателя, Дж/°С. Указанная теплоемкость равна количеству тепла, необходимого для нагрева АД на 1°C 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 экспериментального цеха ООО «Укрспецсервис». В качестве исследуемого рассмотрен асинхронный двигатель типа 4AX80A4Y3 (номинальные параметры: $U_H=220/380\text{ В}$ (Δ/Y), $P_H=1,1\text{ кВт}$, $n_H=1400\text{ об/мин}$, $I_H=4,8/2,8\text{ А}$, $\eta=75\%$, $\cos \varphi=0,81$). Двигатель нагружен на генератор постоянного тока типа ПЗ1У4 (номинальные параметры $U_H=230\text{ В}$, $P_H=1,0\text{ кВт}$, $n_H=1450\text{ об/мин}$, $I_H=4,3\text{ А}$, $\eta=75\%$). 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. Отверстие открывалось только на короткий период для проведения измерений (5 сек), при работе электродвигателя отверстие закрывалось для предупреждения теплообмена между внутренним и внешним воздухом. Токи и напряжения регистрировались с помощью мобильного измерительно-диагностического

комплекса на базе датчиков тока типа LA 25A, датчиков напряжения LV100P (производство фирмы LEM, Швейцария) и АЦП Е-440 (L-CARD, Россия), характеристики измерительных каналов представлены в табл. 1.

Таблица 1– Характеристики измерительных каналов мобильного измерительно-диагностического комплекса

Компонент	Характеристики
АЦП	
ТИП	Е-440
Количество каналов	16 дифференциальных
Разрядность	12 бит
Время преобразования	1,7 мкс
Диапазон входного сигнала	$\pm 5,12\text{В}; \pm 2,56\text{В}; \pm 1,024\text{В};$
Максимальная частота переобразования	200 кГц
Смещение нуля	$\pm 0,5\text{МЗР};$ макс 1МЗР.
Датчик напряжения	
ТИП	LV-400
Диапазон входного сигнала	0 – 500 В
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,015%
Максимальная динамическая погрешность	0,03%
Датчик тока	
ТИП	LA-100С
Диапазон входного сигнала	0 – 250 А
Диапазон выходного сигнала	0 – 10 В
Максимальная статическая ошибка	0,03%
Максимальная динамическая погрешность	0,08%

Для устранения погрешности опыта, обусловленной повышенным нагревом в ходе пуска, испытуемый электродвигатель разогнан с помощью нагрузочной машины, работающей в двигательном режиме. Только по достижении установкой скорости холостого хода, на асинхронный двигатель подано напряжение питания, а нагрузочная машина переведена в режим динамического торможения (рис. 1).

В табл. 2 представлены результаты эксперимента нагрева исследуемого двигателя при идеальном питающем напряжении.

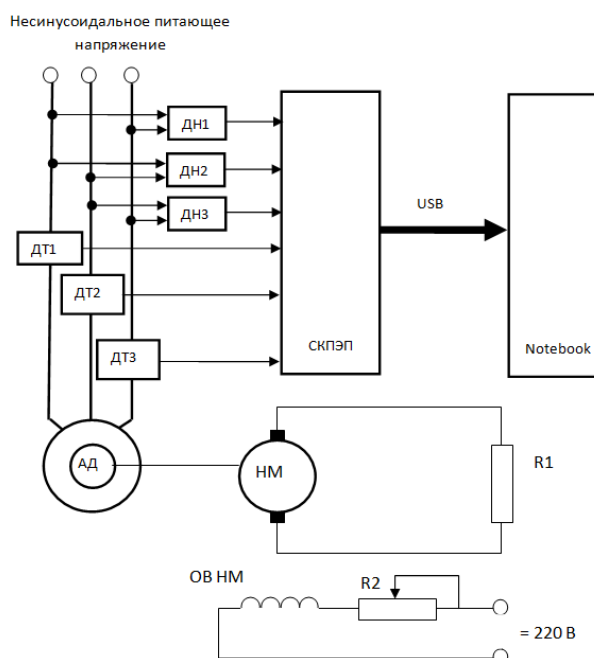


Рис. 1 – Схема опыта по проверке адекватности тепловой модели асинхронного двигателя: ИМ, НМ – испытуемая и нагрузочная машина; СКПЭП – система контроля параметров электропривода (измерительный комплекс); ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока

Таблица 2 – Результаты опыта №1, идеальное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °C	Прогнозируемое по модели значение температуры, °C	Абсолютная погрешность, °C
0	0,0	0	0
120	5,4	6	1
240	10,4	12	1
360	12,0	17	5
480	14,7	21	6
600	26,1	25	-1
720	28,7	28	0
840	34,7	31	-3
960	37,6	34	-3
1080	40,1	37	-3
1200	43,4	39	-5
1320	45,0	41	-4
1440	46,7	42	-4
1560	47,7	44	-4
1680	48,7	45	-3
1800	50,0	47	-3
1920	50,0	48	-2
Установившееся значение	75,7	73	-2

На рис. 2 показана экспериментально полученная кривая нагрева исследуемого двигателя при идеальном питающем напряжении.

За время порядка 62 минут температура двигателя достигла установившегося значения 76,3°C. По результатам опыта составлена система уравнений (2) и произведен расчет параметров одномассовой тепловой модели. Они составили: – коэффициент теплоотдачи двигателя при вращении $A=11,2 \text{ Дж}/(\text{сек} \times ^\circ\text{C})$, – теплоемкость электродвигателя $C – 12,1 \text{ кДж}/^\circ\text{C}$.

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.

Далее были проведены опыты нагрева при разной степени искажения напряжения питания электродвигателя, результаты которых представлены в табл. 3 и табл. 4.

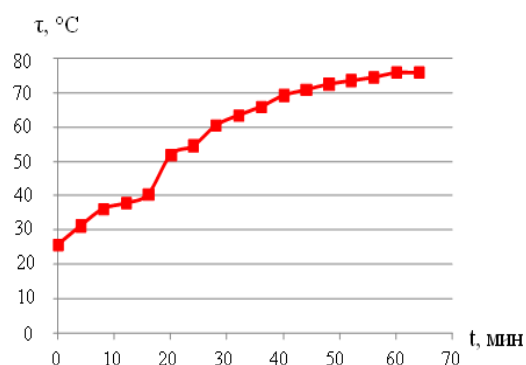


Рис. 2 – Кривая нагрева двигателя при работе под номинальной нагрузкой и идеальной форме питающего напряжения

Таблица 3– Результаты опыта №2, искаженное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °C	Прогнозируемое по модели значение температуры, °C	Абсолютная погрешность, °C
0	0,0	0	0,0
120	12,0	12	0,1
240	23,1	21	1,7
360	30,8	29	1,6
480	33,9	36	-1,7
600	38,7	41	-2,0
720	44,0	45	-0,8
840	44,3	48	-3,9
960	52,0	51	1,0
1080	54,1	53	0,9
1200	54,4	55	-0,6
1320	56,4	56	0,0
1440	56,2	58	-1,4
1560	58,1	59	-0,5
1680	62,0	59	2,6
1800	58,9	60	-1,1
1920	61,2	61	0,6
Установившееся значение	86,0	86	0,0

Таблица 4 – Результаты опыта №3, искаженное питающее напряжение

Время, сек	Действительное значение температуры, °C	Прогнозируемое по модели значение температуры, °C	Абсолютная погрешность, °C
0	0,0	0	0,0
120	13,8	13	0,6
240	21,9	24	-2,1
360	34,1	33	1,5
480	37,8	40	-1,9
600	46,9	45	1,5
720	47,9	50	-2,1
840	55,5	54	1,7
960	55,3	57	-1,6
1080	60,3	59	0,9
1200	61,1	61	-0,2
1320	64,3	63	1,4
1440	65,5	64	1,2
1560	62,8	65	-2,6
1680	62,8	66	-3,4
1800	69,7	67	2,8
1920	68,1	68	0,6
Установившееся значение	93,0	93	0,0

Последующие опыты №2–4 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. 5.

Таблица 5– 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.

Рассмотренные опыты использованы для проверки адекватности предложенной в работе динамической тепловой модели АД. На рис. 3–8 сопоставлены графики превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды в этих опытах нагрева с расчетными кривыми, полученными с помощью электромеханической [11] и тепловой моделью асинхронного двигателя [12]. Здесь так же приведены осциллограммы напряжений и токов соответствующих опытов. Исходными

здесь являются значения параметров модели АД и кривая питающего напряжения произвольной формы, по которым и рассчитывается мгновенная мощность АД. Последняя, в свою очередь, участвует в расчете уровня потерь. Величина же потерь служит входным параметром тепловой динамической модели АД, адекватность которой и проверяется.

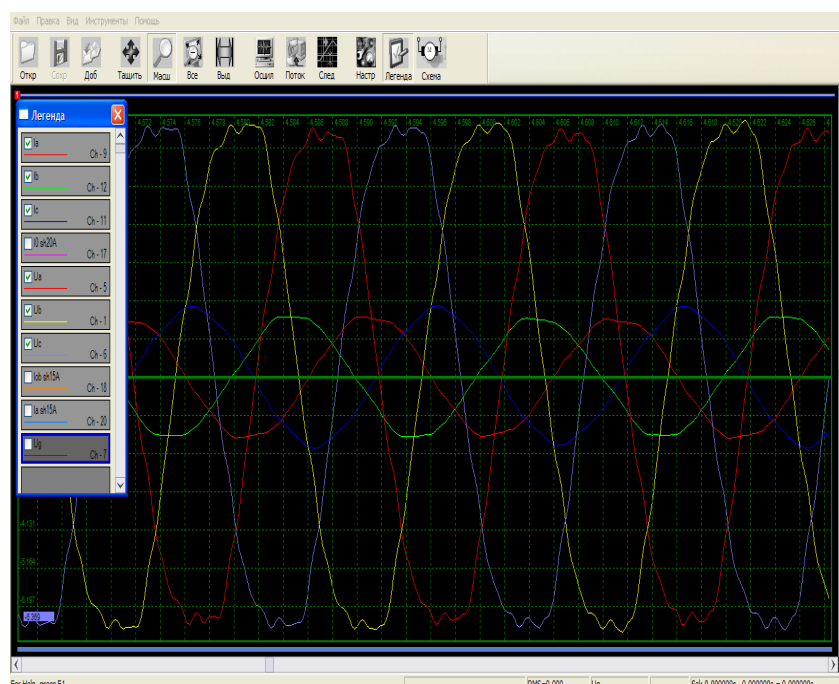


Рис. 3 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 6\%$, $\varepsilon_2 = 4\%$) в опыте № 2

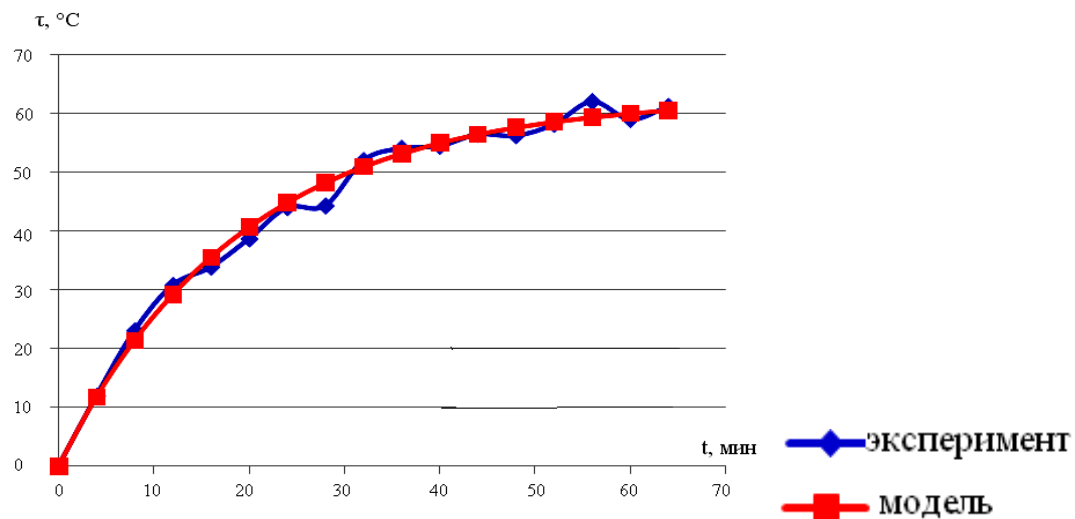


Рис. 4 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 2

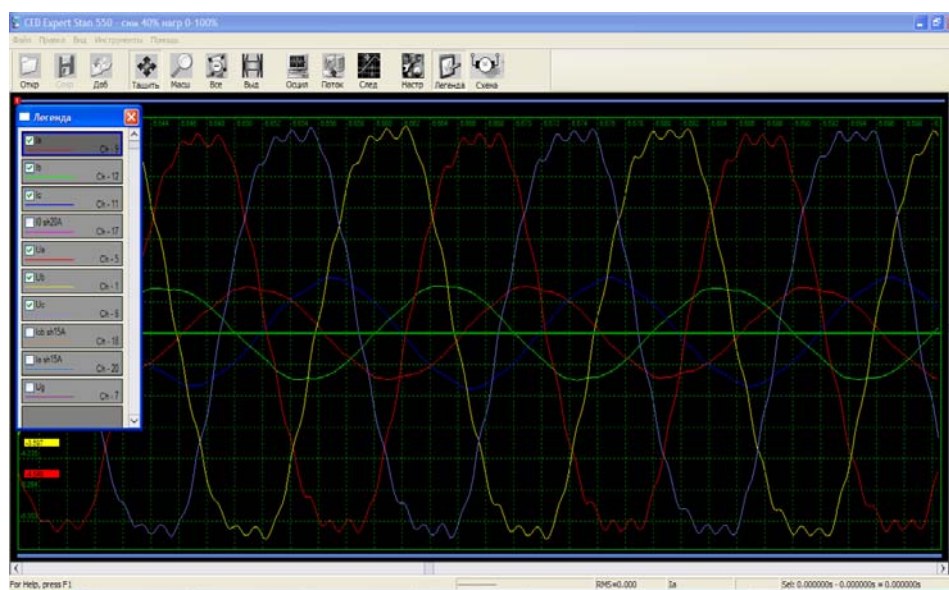


Рис. 5 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 8\%$, $\varepsilon_2 = 4\%$) в опыте № 3

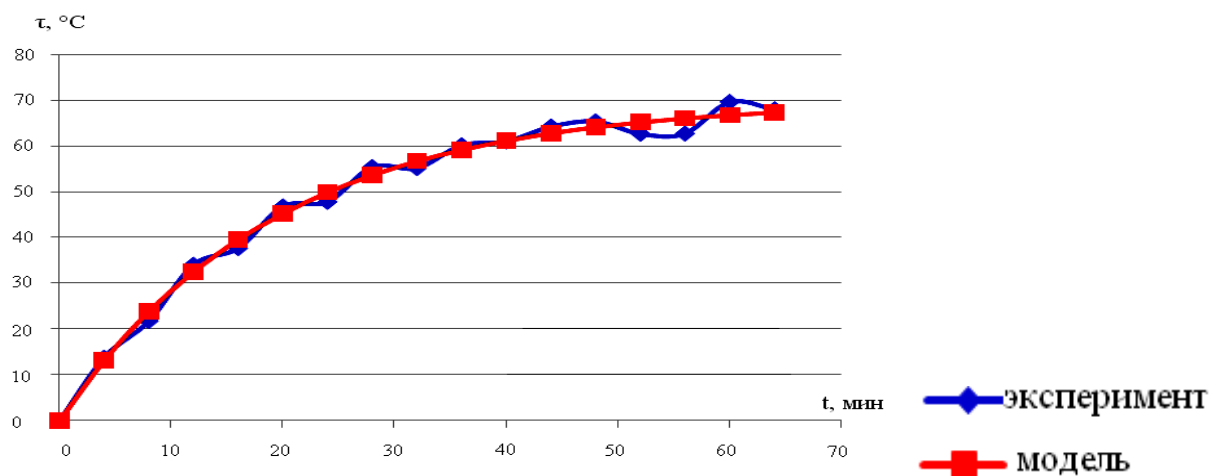


Рис. 6 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 3

Далее был произведен расчет погрешности прогнозируемого значения температуры в динамике нагрева. На рис. 9 показаны экспериментальные и расчетные (прогнозируемые) значения температуры для всех проведенных опытов, которые и использовались для проверки адекватности модели по методу, изложенному в [13–15]. Здесь различный формат маркеров относится к соответствующим опытам.

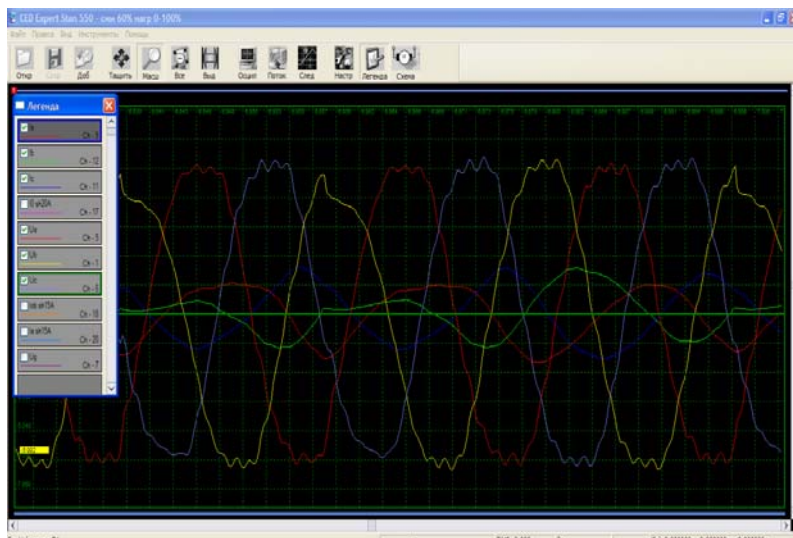


Рис. 7 – Осциллограммы напряжений и токов ($k_U = 13\%$, $\varepsilon_2 = 6\%$) в опыте № 4

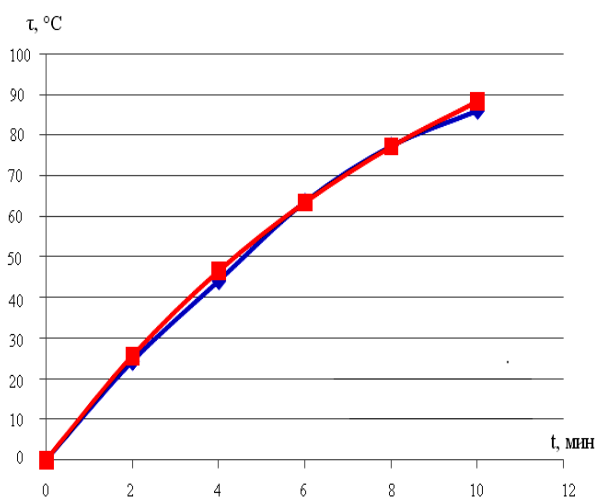


Рис. 8 – Кривые нагрева двигателя в опыте № 4:
—♦— эксперимент
—■— модель

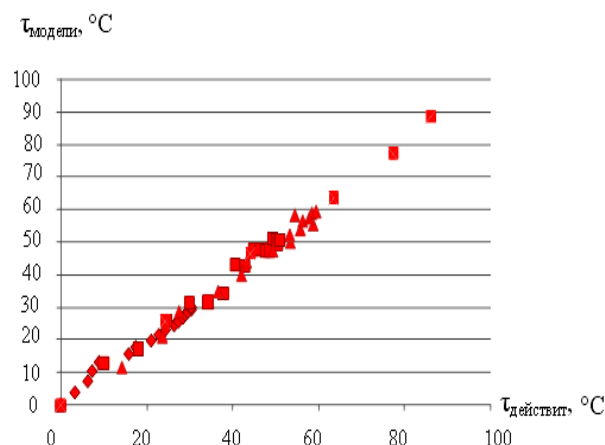


Рис. 9 – Взаимосвязь прогнозируемых τ_m и экспериментальных τ_δ значений превышения температуры обмотки АД

Проведенная проверка адекватности предполагает получение следующего уравнения линейной регрессии

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

где

$$a_0 = \overline{Y_n} - r_{Y_\delta Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_\delta} \overline{Y_\delta}; \quad a_1 = r_{Y_\delta Y_n} \sigma_{Y_n} / \sigma_{Y_\delta}. \quad (4)$$

Здесь $\overline{Y_n}, \overline{Y_\delta}$ – средние значения прогнозируемых и действительных величин; $r_{Y_\delta Y_n}$ – коэффициент корреляции между ними; $\sigma_{Y_n}, \sigma_{Y_\delta}$ – среднеквадратичные отклонения.

Указанные параметры вычислялись по формулам:

$$r_{Y_\delta Y_n} = \frac{\sum_{i=1}^L (Y_{\delta i} - \overline{Y_\delta})(Y_{ni} - \overline{Y_n})}{L \sigma_{Y_\delta} \sigma_{Y_n}}, \quad (5)$$

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

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

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:

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

Среднеквадратическая относительная ошибка прогноза определялась следующим образом:

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

где $Y_{n \max}$ – наибольшее значение прогнозируемой величины.

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

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности предложенной тепловой модели асинхронного двигателя, 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. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с. 2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ИПК. – М: Издательство стандартов. –1998. – 15 с. 3. Родькин, Д. И. Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах [Текст] / Д. И. Родькин, А. П. Черный, В. А. Мартыненко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ. – Вип.1. –2002. – С.81-85. 4. Луговой, А. В. Вопросы практического энергосбережения промышленных предприятий [Текст] / А. В. Луговой, А. П. Черный // Вісник КДПУ. –1998. – Випуск 1(4). – С.73-77. 5. Зиновкин, В. В. Моделирование добавочных потерь в электрооборудовании системы электротехнического комплекса при несинусоидальных токах [Текст] / В. В. Зиновкин // Вісник КДПУ. – Випуск 4/2007(45). – С. 49-52. 6. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 340 с. 7. Чорний, О. П. Теорія і практика моніторингу параметрів електричних двигунів електромеханічних систем: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / О. П. Чорний. – Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т., 2004. – 32 с. 8. Борисенко, А. И. Охлаждение промышленных электрических машин [Текст] / А. И. Борисенко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 212 с. 9. Проектирование электрических машин [Текст] / Под ред.

И. П. Копылова – М.: Энергия, 1980. – 326 с. 10. Рыжков, А. А. Определение параметров тепловой схемы замещения асинхронного двигателя на базе экспериментальных данных [Текст] / А. А. Рыжков. – Проблемы автоматизированного электропривода: теория и практика: сб. науч. тр. Днепродзерж. гос. техн. ун-та (техн. науки): темат. вып. — Днепродзержинск, 2007. – 156 с. 11. Качан, Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – № 3. – Кременчук, 2009. – С.56-58. 12. Качан, Ю. Г. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – Вип. 85. – Дніпропетровськ, 2010. – С.113-118. 13. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 183 с. 14. Ивоботенко, Б. А. Планирование эксперимента в электромеханике [Текст] / Б. А. Ивоботенко, Н. Ф. Ильинский, И. П. Копылов. – М.: Энергия, 1975. – 184 с. 15. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Е. Корн. – М.: Наука, 1984. – 186 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zhezhelenko, I. V. (1996). Voprosy kachestva jelektroenergii v jelektroustanovkah. Mariupol': PGТУ, 173. 2. GOST 13109-97 (1998). Normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektronsnabzhenija obshhego naznachenija. IPK. - Moscow: Izdatel'stvo standartov, 15. 3. Rod'kin, D. I. (2002). Obosnovanie kriteriev kachestva preobrazovanija jenerгии v jelektromehanicheskikh sistemah. Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu. Kremenchuk: KDPU, Vip.1, 81-85. 4. Lugovoj, A. V. (1998). Voprosy prakticheskogo jenergosberezhenija promyshlennyh predpriyatij. Visnik KDPU, Vipusk 1(4), 73-77. 5. Zinovkin, V. V. (2007). Modelirovanie dobavочnyh poter' v jelektrouoborudovanii sistemy jelektrrotehnicheskogo kompleksa pri nesinusoidal'nyh tokah. Visnik KDPU, Vipusk 4, 49-52. 6. Zhezhelenko, I. V. (2000). Vysshie garmoniki v sistemah jelektronsnabzhenija prompredpriyatij. – Moscow: Jenergoatomizdat, 340. 7. Chornij, O. P. (2004). Teorija i praktika monitoringu parametriv elektrichnih dviguniv elektromechanichnih sistem: Avtoref. dis. d-ra tehn. nauk: 05.09.03. – Dnipropetrovs'k: Nac. girn. un-t., 32. 8. Borisenko, A. I. (1983). Ohlazhdenie promyshlennyh jelektricheskikh mashin. - Moscow: Jenergoatomizdat, 212. 9. Proektirovanie jelektricheskikh mashin.(1980). Pod red. I. P.Kopylova. - Moscow: Jenergija, 326. 10. Ryzhkov, A. A. (2007). Opredelenie parametrov teplovoj shemy zameshhenija asinhronnogo dvigatelja na baze jeksperimental'nyh dannyh.Problemy avtomatizirovannogo jelektroprivoda: teorija i praktika: sb. nauch. tr. Dneprodzерж. gos. tehn. un-ta (tehn. nauki): temat. vyp. — Dneprodzержinsk, 156. 11. Качан, Ю. Г. (2009). Realizacija modeli asinhronnogo dvigatelja dlja uslovij nekachestvennogo pitaniya. Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu, 3. – Kremenchuk, 56-58. 12. Качан, Ю. Г. (2010). Teplovaja sostavljajushhaja jekonomicheskogo ushherba ot raboty asinhronnogo dvigatelja v uslovijah nekachestvennoj jelektrouenergii. Girn. elektromechanika ta avtomatika: nauk.-tehn. Zb., Vip. 85. – Dnipropetrovs'k, 113-118. 13. Adler, Ju. P. (1976) Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij. - Moscow: Nauka, 183. 14. Ivobotenko, B. A. (1975). Planirovanie jeksperimenta v jelektromehanike. - Moscow: Jenergija, 184. 15. Korn, G. (1984). Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. - Moscow: Nauka, 186.

Надійшла (received) 11.12.2014