УДК.621.313.2

А.Н. ПЕТРЕНКО, к.т.н., ас., НТУ «ХПИ», г. Харьков
В.П. ШАЙДА, к.т.н., доц., НТУ «ХПИ», г. Харьков
Н.Я. ПЕТРЕНКО, к.т.н., доц., НТУ «ХПИ», г. Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЧАСТОТНО–УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПУСКЕ

A.N. PETRENKO, cand.of engin. scien., NTU «KPI», Kharkov, Ukraine
V.P. SHAYDA, cand.of engin. scien., NTU «KPI», Kharkov, Ukraine
N.Ya. PETRENKO, cand.of engin. scien., NTU «KPI», Kharkov, Ukraine

RESEARCH OF THE THERMAL STATE OF THE FREQUENCY-GUIDED ASYNCHRONOUS ENGINE AT STARTING

В статье приводятся результаты исследования теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в момент включения и выхода в установившийся режим работы. Результаты моделирования подтверждены ранее полученными экспериментальными данными.
Ключевые слова: частотно-управляемых асинхронный двигатель, тепловое состояние двигателя, метод эквивалентных тепловых схем, пуск.

In the article results over of research of the thermal state of the frequency-guided asynchronous engine in the moment of plugging and output in the set office hours. Design results are confirmed by the before experimental finding.
Key words: the frequency-guided asynchronous motor, thermal state of motor, method of equivalent thermal charts, starting duty.

Введение. Проблема улучшения технико-экономических показателей электроприводов в значительной мере обусловлена необходимостью энергосбережения. Эффективным способом улучшения энергетических показателей электроприводов является замена нерегулируемых приводов на регулируемые. При этом решаются задачи дальнейшей механизации и автоматизации производства, разработки новых технологических процессов, повышения качества и конкурентоспособности продукции. Наиболее перспективными в настоящее время являются регулируемые электропривода на базе асинхронных двигателей (АД) и полупроводниковых преобразователей частоты (ППЧ). В эксплуатации чаще всего используются два основных типа преобразователей частоты ППЧ с автономным инвертором тока (АИН) и с широтно-импульсным модулятором (ШИМ). Они отличаются формой выходного напряжения, что в конечном итоге влияет на величину потерь от высших гармоник напряжения (ВГН) и тепловое состояние двигателя при пуске и номинальном режиме работы.

Частотно-регулируемые электропривода востребованы городским хозяйством в приводах насосов для подачи воды и лифтов. Тепловое состояние АД в значительной мере определяет надежность их работы, т.к. практика эксплуатации АД показывает, что в основном АД выходят из строя из-за перегрева обмотки статора [1, 2]. Одной из причин возникновения перегрева являются токовые перегрузки, которые возникают как при пуске, так и при работе АД. Поэтому исследование теплового состояния частотно-управляемого АД при пуске, с целью определения реальных перегревов обмотки статора, является актуальной задачей.

Тепловое состояние АД при пуске. Рассмотрим вопрос включения частотно-управляемого АД и его выход в установившийся тепловой режим при номинальной нагрузке. Считаем, что $\gamma = U_{1ф} / U_{1фN} = 1$, $\alpha = f_1 / f_{1N} = 1$, питание двигателя от ППЧ с АИН, форма напряжения – ступенчатая.

Все виды потерь в двигателе рассчитывались в соответствии с [3].

Для решения задачи определения теплового состояния АД использовался метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС) [4, 5], при этом ЭТС была адаптирована к условиям работы частотно-управляемого АД. Вид адаптированной ЭТС показан на рис. 1.

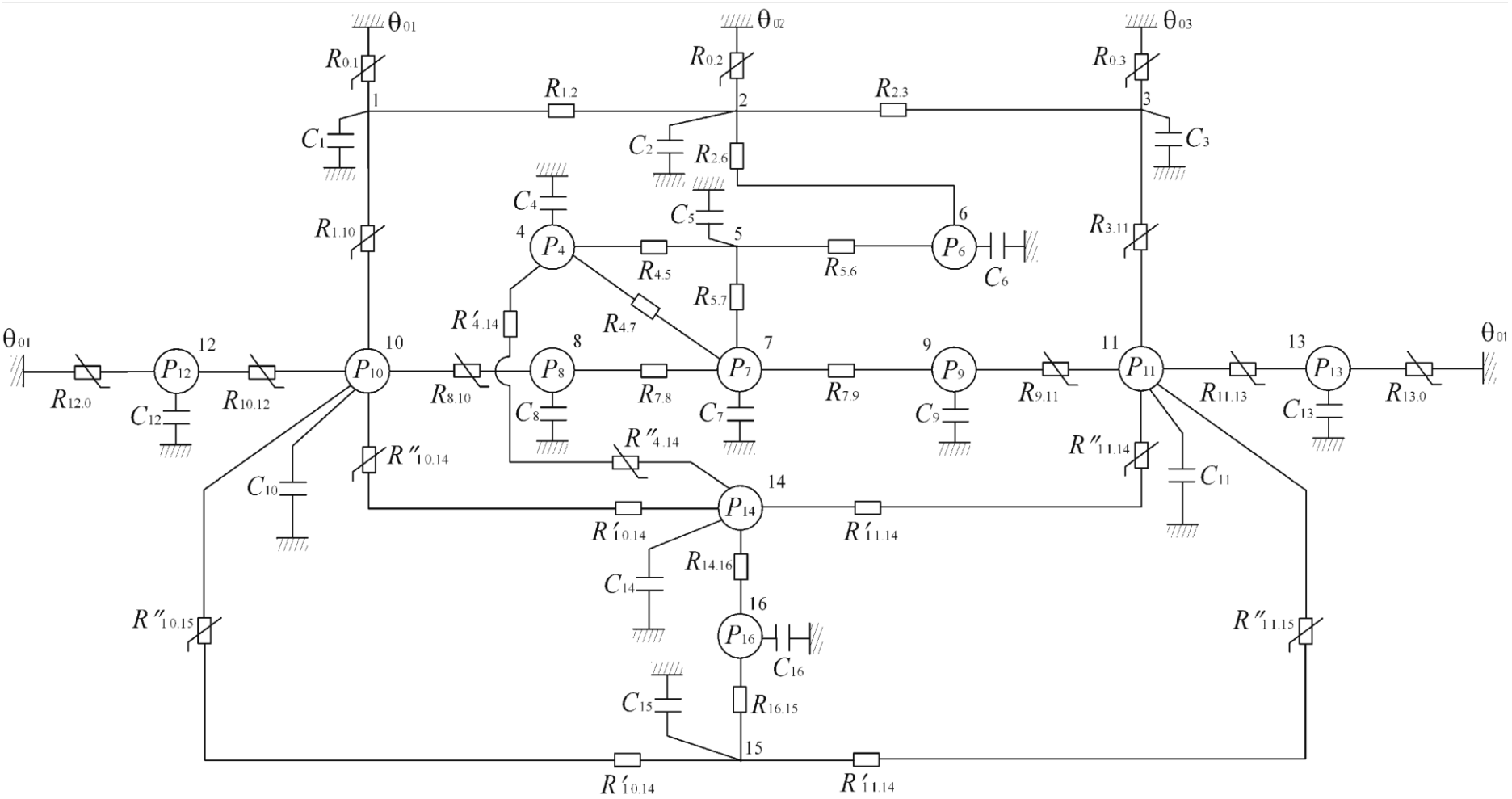

Рис. 1. Динамическая ЭТС частотно-управляемого АД

Основные обозначения, которые приведены на рис. 1:

1) известные, заданные температуры:

θ_{01} – температура окружающей среды;

θ_{02}, θ_{03} – температуры воздуха в наружном контуре с учетом подогрева;

2) источники тепла в конструктивных узлах двигателя, включающие все виды потерь связанных с основной гармоникой напряжения (ОГН) и высшими гармониками напряжения (ВГН) с учетом насыщения магнитной системы:

P_4, P_6 – источники тепла, обусловленные основными и добавочными потерями в зубцах и спинке сердечника статора;

P_7 – источник тепла в пазовой части обмотки статора, создаваемый основными и добавочными потерями мощности;

P_8, P_9 – источник тепла в лобовых частях обмотки статора, создаваемый основными и добавочными (от ВГН) потерями;

$P_{10}, P_{11} = 0{,}5P_{air}$ – источник тепла, создаваемый вентиляционными потерями;

$P_{12}, P_{13} = 0{,}5P_{mec}$ – источник тепла, создаваемый за счет трения в подшипниках;

P_{14} – источник тепла, вызванный основными (от ОГН) и дополнительными (от ВГН) потерями в стержнях обмотки и зубцах сердечника ротора;

P_{16} – источник тепла, обусловленный дополнительными (от ВГН) потерями в спинке сердечника ротора;

3) тепловые сопротивления узлов конструкции двигателя:

$R_{4.5}, R_{2.6}$ – тепловые сопротивления зубцов и спинки сердечника статора;

$R_{4.7}, R_{5.7}$ – тепловые сопротивления пазовой части обмотки статора с зубцами и спинкой сердечника;

$R_{7.8}, R_{7.9} = R'_{10.14} = R'_{11.14}$ – аксиальные тепловые сопротивления обмоток статора и ротора соответственно;

$R_{8.10} = R_{9.11}$ и $R''_{10.14} = R''_{11.14}$ – тепловые сопротивления от лобовых частей обмоток статора и ротора к внутреннему воздуху;

$R_{1.10} = R_{3.11}$ и $R_{10.12} = R_{11.13}$ – тепловые сопротивления между внутренним воздухом и «свисающими» частями корпуса;

$R_{1.2} = R_{2.3}$ и $R'_{10.15} = R'_{11.15}$ – тепловые сопротивления корпуса и вала в аксиальном направлении;

$R_{16.15}$ – тепловое сопротивление сердечника ротора и вала;

$R'_{4.14}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора.

Тепловые сопротивления ЭТС проводятся в соответствии с [5, 6].

Математическая модель. На основании ЭТС, приведенной на рис. 1, была разработана математическая модель (1), адаптированная к условиям поставленной задачи. Дифференциальные уравнения теплового баланса всех узлов образуют систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} C_1 \dfrac{d\theta_1}{dt} = \left(-\sum\limits_{i=2}^{m} \lambda_{i1} \right) \cdot \theta_1 + \left(-\sum\limits_{i=2}^{m} (\lambda_{i1} \cdot \theta_i) \right) + P_1; \\ C_2 \dfrac{d\theta_2}{dt} = \left(-\sum\limits_{i=1}^{k(i \neq 2)} \lambda_{i2} \right) \cdot \theta_2 + \sum\limits_{i=1}^{k(i \neq 2)} (\lambda_{i2} \cdot \theta_i) + P_2; \\ \dots\dots\dots\dots \\ C_n \dfrac{d\theta_n}{dt} = \left(-\sum\limits_{i=1}^{q(i \neq n)} \lambda_{in} \right) \cdot \theta_n + \sum\limits_{i=1}^{q(i \neq n)} (\lambda_{in} \cdot \theta_i) + P_n. \end{cases} \quad (1)$$

где $C_1 - C_n$ – теплоемкости соответствующих узлов конструктивных элементов двигателя; $\theta_1 - \theta_n$ – температуры соответствующих узлов двигателя; $\lambda_1 - \lambda_n$ – тепловые проводимости от одного из соседних узлов i к данному узлу от 1 до n; $P_1 - P_n$ – мощность тепловыделения в данном узле от 1 до n; t – текущее время; m – количество тел, имеющих тепловую связь с первым телом ($n = 1$); k – количество тел, имеющих тепловую связь со вторым телом ($n = 2$); q – количество тел, имеющих тепловую связь с n - ым телом.

Расчет теплоемкостей узлов проводим по выражению

$$c_i = c_{i\text{уд}} \cdot m_i, \quad (2)$$

где $c_{i\text{уд}}$ – удельная теплоемкость материала i - го узла (медь, алюминий, электротехническая сталь, воздух, конструкционная сталь, изоляция пазов); m_i – масса материала i - го узла, кг.

Тестирование математической модели. Математическая модель была протестирована на примере асинхронного двигателя типа АИР90LB4 ($P_N = 2{,}5$ кВт, $U_{\text{ф}N} = 220$ В, $f_{1N} = 50$ Гц, $n_N = 1430$ об/мин).

Математическая модель решалась по универсальному гибридному методу Адамса – BDF [7].

Начальные температуры $\theta_{\text{нач}}$ всех узлов одинаковы и равны 25°С, время расчета – 9000 секунд, шаг по времени – 138,46 секунд.

В таблице 1 приведены значения температур узлов, полученные при расчете как динамической, так и стационарной ЭТС. Значения температур соответствуют установившемуся режиму.

Таблица 1

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8
θ_i, °C по динамической ЭТС	37	59	50	79	73	68	95	102

Продолжение таблицы 1

Номер узла	9	10	11	12	13	14	15	16
θ_i, °C по динамической ЭТС	104	73	81	57	71	125	124	125

По результатам расчета построены кривые нагрева отдельных узлов конструкции двигателя, которые показаны на рис. 2, там же приведены аналогичные кривые температурных зависимостей, полученные в результате экспериментального исследования двигателя АИР90LB4 [8]. Как видно из рис. 2 отличие расчетных и экспериментальных данных незначительное.

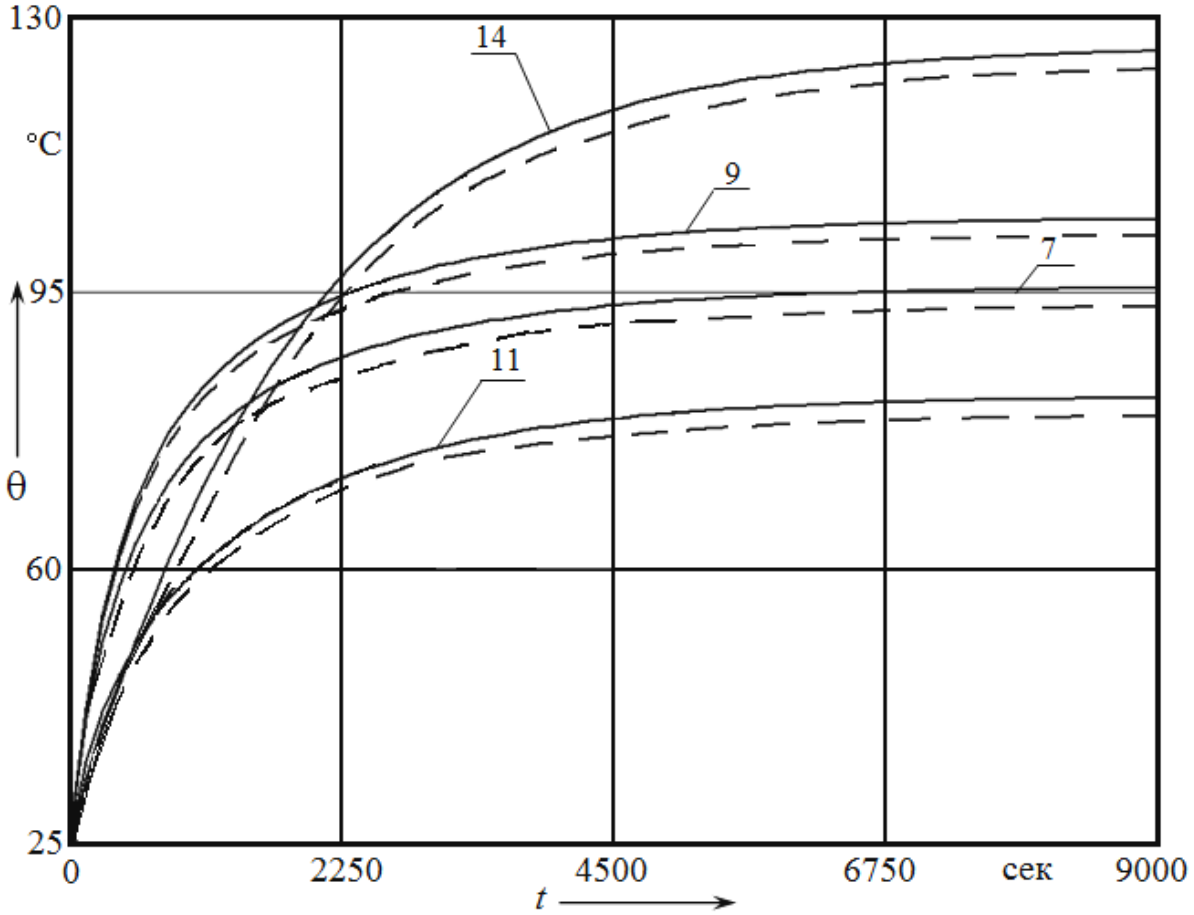

Рис. 2. Кривые нагревания узлов динамической ЭТС
(номера кривых соответствуют номерам узлов ЭТС на рис.1):
сплошная линия – расчет; пунктирная линия – эксперимент

Использование параметра «тепловая постоянная времени» при численном моделировании нестационарного теплового процесса на основе динамической ЭТС невозможно из-за сложных взаимных тепловых связей элементов конструкции двигателя. Определение длительности времени выхода на установившуюся температуру $\theta_{i\text{уст}}$ элементов конструкции двигателя осложняется незначительными, но существенными приращениями температур на конечных шагах по времени. В связи с этим основной характеристикой скорости нарастания температур отдельных узлов, предложено использовать время достижения 95% превышения их температур над начальной температурой – $t(0{,}95)$.

Параметр $t_i(0{,}95)$ в определенной мере выполняет роль тепловой постоянной времени элемента конструкции, как характеристика скорости нарастания температуры в нестационарном режиме.

При этом температура 1 – го узла в момент времени $t_1(0{,}95)$:

$$\theta_{1(0,95)} = (\theta_{1\text{уст}} - \theta_{\text{нач}}) \cdot 0{,}95 + \theta_{\text{нач}} = 0{,}95 \cdot \theta_{1\text{уст}} + 0{,}05 \cdot \theta_{\text{нач}}. \quad (3)$$

Значения указанных температур и длительностей промежутков времени приведены в таблице 2.

Таблица 2

Номер узла ЭТС, n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta_n(0{,}95)$, °С	36	57	49	76	70	66	92	38
$t_n(0{,}95)$, секунды	4160	4012	3875	4017	4014	4013	3739	3735

Продолжение таблицы 2

Номер узла ЭТС, n	9	10	11	12	13	14	15	16
$\theta_n(0{,}95)$, °С	100	70	79	55	69	120	119	120
$t_n(0{,}95)$, секунды	3736	4434	4426	4429	4425	5122	5145	5137

Выводы.

1. В процессе исследования температуры частотно-управляемого АД в момент включения отмечены определенные различия в скорости нарастания температур отдельных узлов конструкции при выходе на установившийся режим. Это обусловлено различной теплоемкостью узлов и взаимным влиянием отдельных узлов друг на друга.

2. Использование параметра «тепловая постоянная времени» для элементов конструкции двигателя при моделировании нестационарного теплового процесса на основе динамической ЭТС невозможно.

3. В качестве характеристики скорости нарастания температур отдельных узлов предложено использовать время достижения 95 % превышения их температур над начальной температурой.

4. С помощью предложенной ЭТС и математической модели можно исследовать тепловое состояние частотно-управляемого АД при различных законах регулирования, форме питающего напряжения и режимах работы от S1 до S8.

Литература

1. Неисправности асинхронного электродвигателя: статья / Электромонтажные работы / Официальный сайт ООО «Малахит» Россия // http://malahit-irk.ru/index.php/2011-01-13-09-04-43/178-2011-06-11-06-24-45.html, 10.01.2013.

2. Федоров М.М. К вопросу построения систем диагностики неисправностей асинхронных двигателей / М.М. Федоров, А.А. Ткаченко // Электротехника и электромеханика. – 2006. – №2. – С. 59 – 61.

3. Осташевский Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. – №3. – С. 37 – 41.

4. Алексеев Е.Р. Моделирование теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах / Е.Р. Алексеев, М.М. Федоров, Л.С. Сорокина // Известия ТРТУ. Тематический выпуск. Материалы Всероссийской научно-технической конференции Компьютерные технологии в инженерной и управленческой деятельности. – 2002. – №2 (25). – С. 34 – 36.

5. Борисенко А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. / А. И. Борисенко, О. Н. Костиков, А. И. Яковлев – М.: Энергоатомиздат, 1983, – 296 с.

6. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. / А. И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев – М.: Энергия, 1974, - 560 с.

7. Кирьянов Д.В. Mathcad14. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007. – 704 с.

8. Петренко А.Н. Экспериментальные исследования нагрева частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных формах питающего напряжения / А.Н. Петренко // Электрика. – 2011. – №4. – С. 20 – 22.