

*Продовжено дослідження теплового стану частотно-керованого АД в нестационарних режимах роботи методом ЕТС. Розроблена математична модель дозволить оптимально по потужності використовувати двигуни, розраховані на номінальний режим S1, при їх роботі в нестационарних режимах (S3 – S8)*

*Ключові слова: частотно-керований АД, тепловий стан двигуна, метод ЕТС*

*Продолжено исследование теплового состояния частотно-управляемого АД в нестационарных режимах работы методом ЭТС. Разработанная математическая модель позволит оптимально по мощности использовать двигатели, рассчитанные на номинальный режим S1, при их работе в нестационарных режимах (S3 – S8)*

*Ключевые слова: частотно-управляемый АД, тепловое состояние двигателя, метод ЭТС*

*Research of the thermal state of the frequency-guided AM in non-stationary duty of equivalent thermal charts a method is continued. The worked out mathematical model will allow optimally on power to use motors, calculated on the nominal duty S1, during their work in the non-stationary duty (S3 – S8)*

*Key words: the frequency-guided asynchronous motor, thermal state of motor, method of equivalent thermal charts*

# НАГРЕВ ЧАСТОТНО – УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ РЕЖИМЕ

**Н. А. Остащевский**

Кандидат технических наук, профессор\*

**В. П. Шайда**

Кандидат технических наук, доцент\*

\*Кафедра «Электрические машины»

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

ул. Фрунзе, 21; г. Харьков, Украина, 61002

Контактный тел.: (057) 70-76-577, 097-45-43-415

E – mail: vito@kpi.kharkov.ua

**А. Н. Петренко**

Начальник расчетного отдела

СКБ «ХЭЛЗ «Укрэлектромаш»

ул. Искринская, 37, г. Харьков, Украина, 61050

## 1. Введение

Электрическая машина в нестационарном тепловом режиме представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных элементов, изменение температуры которых описывается системой уравнений теплопроводности, дополняемых взаимозависимыми граничными условиями. Все это создает значительные, подчас неразрешимые трудности для аналитического расчета нестационарного теплового процесса.

На практике для исследования теплового состояния электрических машин в нестационарных режимах используется метод эквивалентных тепловых схем (метод ЭТС) [1]. В статье исследуется нагрев частотно – управляемого асинхронного двигателя в перемежающемся режиме работы (S6 по ГОСТ 183 – 74) и продолжают исследования, которые начаты в работах [2, 3].

## 2. Постановка и решение задачи

Метод ЭТС, используемый для определения стационарного теплового состояния электрической ма-

шины, т.е. при режиме работы S1, был преобразован соответственно к условиям поставленной задачи [3].

В частности, узлы ЭТС дополняются теплоемкостями элементов конструкции электрической машины, отображенных в ЭТС этими узлами. В результате получаем так называемую «динамическую ЭТС». Система уравнений теплового баланса, которая для стационарного режима работы электрической машины представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, для нестационарных режимов преобразуется в систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Для каждого элемента конструкции (узла ЭТС) дифференциальное уравнение теплового баланса имеет вид аналогичный уравнению для первого узла:

$$C_1 \cdot \frac{d\theta_1}{dt} = \left( -\sum_{i=2}^m \lambda_{i1} \right) \cdot \theta_1 + \sum_{i=2}^m \lambda_{i1} \cdot \theta_i + P_1 \quad (1)$$

где  $m$  – количество узлов, имеющих тепловую связь с первым узлом отличную от нуля;

$C_1 - C_i$  – теплоемкости узлов;

$\theta_1 - \theta_i$  – температуры узлов;

$\sum_{i=2}^m \lambda_{i1}$  – собственная тепловая проводимость первого узла;

$\lambda_{i1}$  – взаимная тепловая проводимость первого узла с  $i$ -ым узлом ЭТС;

$P_1$  – мощность тепловыделения первого узла.

Применительно к исследуемому в [2] двигателю типа АИР160S4 (15 кВт, 660/380 В, 1476 об/мин, 2р = 4) динамическая ЭТС показана на рис. 1.

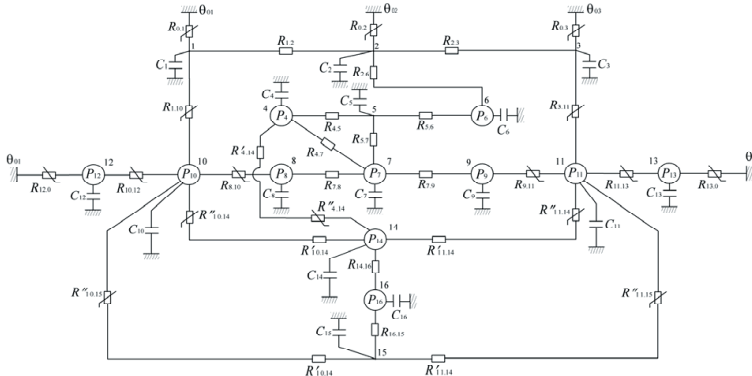


Рис. 1. Динамическая ЭТС асинхронного частотно-управляемого асинхронного двигателя

В основе этой ЭТС лежит «стационарная ЭТС», подробно описанная в [2].

Рассмотрим процесс нагрева исследуемого двигателя в перемежающемся режиме работы – S6 вплоть до выхода на квазиустановившийся режим. При режиме S6 работа под нагрузкой чередуется с холостым ходом и характеризуется продолжительностью нагрузки ПН, которая измеряется в процентах. Примем для исследуемого двигателя ПН = 60%, длительность цикла – 10 минут, интервал нагрузки  $T_n$  – 6 минут, интервал холостого хода  $T_x$  – 4 минуты.

Каждый из интервалов характеризуется своим уровнем основных потерь, дополнительные потери  $\Sigma P_{adv}$ , от высших гармоник напряжения, на интервалах  $T_n$  и  $T_x$  одинаковы [1]. Основные потери соответствуют уровню потерь при  $P = 1,0 P_N$  на интервале  $T_n$  и уровню потерь холостого хода на интервале  $T_x$ . Рассматривается режим  $\alpha = \gamma = 1,0$ , питание двигателя от АИН, т.е. по питанию поддерживается режим А (форма напряжения ступенчатая).

При переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода основные электрические потери в обмотках статора  $P_{els}$ , ротора  $P_{elr}$  и дополнительные потери  $P_{ad}$ , от основной гармоники напряжения, уменьшаются примерно в 15 раз. Уменьшение  $P_{ad}$  приводит к уменьшению основных магнитных потерь в сердечнике статора и основных электрических потерь в обмотке ротора. Кроме того, уменьшается температура окружающего воздуха  $\theta_{02}$  и  $\theta_{03}$  в наружном контуре охлаждения. С учетом неизменности потерь  $\Sigma P_{adv}$  это приводит к изменению мощности тепловыделения в узлах динамической ЭТС, а именно в узлах: 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 14. В остальных узлах мощности тепловыделения остаются без изменения.

Математическая модель теплового состояния исследуемого двигателя в нестационарных режимах, адаптированная к условиям поставленной задачи,

представляет собой систему, состоящую из 16 – ти уравнений:

- 1).  $\frac{d\theta_1}{dt} = -23,14 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_1 + 3,88 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_2 + 2,91 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} + 408 \cdot 10^{-3}; (408 \cdot 10^{-3});$
- 3).  $\frac{d\theta_3}{dt} = 3,88 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_2 - 15,45 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_3 + 2,91 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} + 304 \cdot 10^{-3}; (233 \cdot 10^{-3});$
- 4).  $\frac{d\theta_4}{dt} = -71,17 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_4 + 56,86 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_5 + 12,37 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_7 + 1,94 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{14} + 39 \cdot 10^{-3}; (28,1 \cdot 10^{-3});$
- 5).  $\frac{d\theta_5}{dt} = 2268 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_4 - 5216 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_5 + 2907 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_6 + 40,28 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_7 + 0; (0);$
- 6).  $\frac{d\theta_6}{dt} = 15,37 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_2 + 21,33 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_5 - 36,71 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_6 + 31,4 \cdot 10^{-3}; (19,4 \cdot 10^{-3});$
- 7).  $\frac{d\theta_7}{dt} = 23,83 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_4 + 1,94 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_5 - 50,42 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_7 + 12,32 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_8 + 12,32 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_9 + 257 \cdot 10^{-3}; (41,7 \cdot 10^{-3});$
- 8).  $\frac{d\theta_8}{dt} = 8,28 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_7 - 10,78 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_8 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} + 129 \cdot 10^{-3}; (20,9 \cdot 10^{-3});$
- 9).  $\frac{d\theta_9}{dt} = 8,28 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_7 - 10,78 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_9 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} + 129 \cdot 10^{-3}; (20,9 \cdot 10^{-3});$
- 10).  $\frac{d\theta_{10}}{dt} = 1612 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_1 + 1142 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_8 - 50,51 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} + 721 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{14} + 76,4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{15} + 1498 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{12} + 6043 \cdot 10^{-3}; (6043 \cdot 10^{-3});$
- 11).  $\frac{d\theta_{11}}{dt} = 1612 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_3 + 1142 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_9 - 50,51 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} + 1498 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{13} + 721 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{14} + 76,4 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{15} + 6043 \cdot 10^{-3}; (6043 \cdot 10^{-3});$
- 12).  $\frac{d\theta_{12}}{dt} = 7,68 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} - 12,53 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{12} + 152 \cdot 10^{-3}; (152 \cdot 10^{-3});$
- 13).  $\frac{d\theta_{13}}{dt} = 7,68 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} - 10,1 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{13} + 92 \cdot 10^{-3}; (92 \cdot 10^{-3});$
- 14).  $\frac{d\theta_{14}}{dt} = 0,65 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_4 + 0,41 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} + 0,41 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} - 8,27 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{14} + 6,81 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{16} + 74,9 \cdot 10^{-3}; (24,5 \cdot 10^{-3});$
- 15).  $\frac{d\theta_{15}}{dt} = 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{10} + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{11} - 15,6 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{15} + 15,3 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{16} + 0; (0);$
- 16).  $\frac{d\theta_{16}}{dt} = 12,78 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{14} + 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{15} - 21,5 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_{16} + 1,53 \cdot 10^{-3}; (1,53 \cdot 10^{-3});$

Уравнения записаны для интервала нагрузки  $T_H$ .

В скобках в каждом уравнении приведены значения свободного члена на интервале холостого хода  $T_X$ .

Для решения системы дифференциальных уравнений использовался универсально-гибридный метод Адамса – BDF [4]. Шаг по времени – 60 секунд.

Начальные значения температур всех узлов динамической ЭТС  $\theta_{01} = 25^\circ\text{C}$ . При переходе в пределах  $k$ -го цикла от интервала нагрузки  $T_H$  к интервалу холостого хода  $T_X$  и от интервала холостого хода  $k$ -го цикла к интервалу нагрузки  $(k+1)$ -го цикла, для всех узлов динамической ЭТС соблюдаются условия:

$$\theta_{k \text{ нач}} \Big|_{t=0} = \theta_{k \text{ кон}} \Big|_{t=T_H}; \theta_{k+1 \text{ нач}} \Big|_{t=0} = \theta_{k \text{ кон}} \Big|_{t=T_X} \quad (2)$$

Текущее время  $t$  на каждом интервале каждого цикла расчета начинается с нуля:  $0 \leq t \leq T_X, 0 \leq t \leq T_H$ , цикл начинается с интервала нагрузки.

Расчет температур заканчивался, когда начальные значения температур на интервалах холостого хода двух последующих циклов отличались не более чем на 0,1%. В нашем случае для этого потребовалось 32 цикла. С достаточной для тепловых расчетов точностью, можно считать, что квазиустановившийся режим наступает после 13 циклов.

### 3. Анализ результатов расчетов

По результатам расчета построены кривые нагрева пазовой части обмотки статора (узел 7), обмотки ротора (узел 14), сердечника статора (узел 6), части оребренного корпуса (узел 2) приведенные на рис. 2, 3, 4.

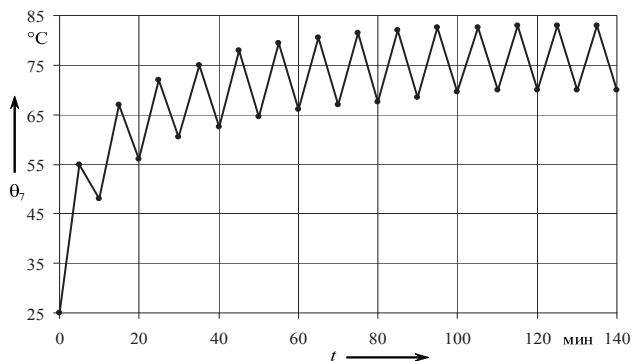


Рис. 2. Зависимость температуры обмотки статора от времени  $\alpha = \gamma = 1,0$ . Режим А

В табл. 1 приведены значения температур узлов динамической ЭТС в квазиустановившемся режиме при  $t = T_H$  и  $t = T_X$ , т.е. максимальные и минимальные значения.

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta_i, ^\circ\text{C}$ при $t = T_H$	34,24	52,25	45,89	68,24	63,35	59,28	83,08	88,44
$\theta_i, ^\circ\text{C}$ при $t = T_X$	33,63	50,73	45,18	62,97	59,55	56,75	69,41	72,57
$\theta_i, ^\circ\text{C}$ при $t = T_H$	90,18	63,29	70,88	50,43	62,13	103,07	99,84	101,24
$\theta_i, ^\circ\text{C}$ при $t = T_X$	74,33	58,20	65,76	48,71	60,42	97,52	98,85	98,76

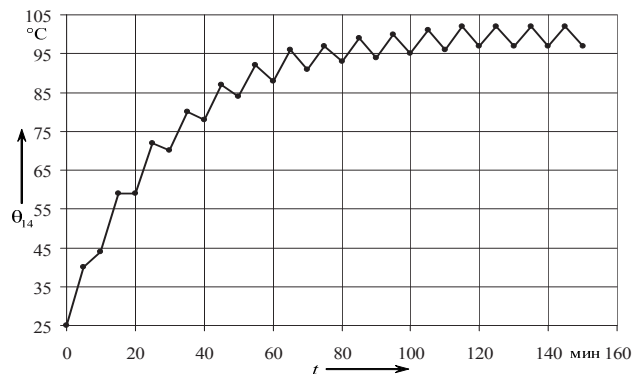


Рис. 3. Зависимость температуры обмотки ротора от времени  $\alpha = \gamma = 1,0$ . Режим А

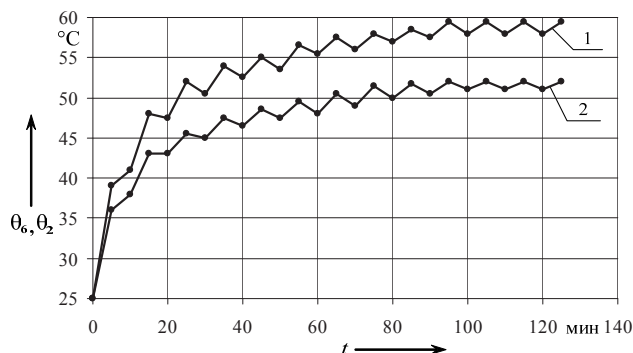


Рис. 4. Зависимость температуры сердечника статора  $\theta_6$  – кривая 1 и корпуса  $\theta_2$  – кривая 2 от времени.  $\alpha = \gamma = 1,0$ . Режим А

Из результатов расчета и кривых нагрева следует, что теплообмен в двигателе на начальном участке (первый и второй циклы) отличается от теплообмена в квазиустановившемся режиме. В частности, для обмотки ротора на этих циклах имеет место реверс теплового потока через воздушный зазор в сравнении с его направлением в квазиустановившемся режиме. Это обусловлено текущими значениями температур зубцов статора (узел 4) и обмотки ротора (узел 14) и соотношением теплоемкостей обмотки статора и ротора. На первом и втором циклах  $\theta_4 > \theta_{14}$ , поэтому на интервалах холостого хода не происходит уменьшения температуры обмотки ротора. В квазиустановившемся режиме  $\theta_4 = 68,24^\circ\text{C}$ ,  $q_{14} = 103,07^\circ\text{C}$ , тепловой поток через воздушный зазор идет в направлении «ротор – зубцы статора» и на интервалах холостого хода  $\theta_{14}$  уменьшается. Максимальные и минимальные значения температур в пределах одного цикла (размах колебаний температуры) в квазиустановившемся режиме определяется мощностью тепловыделения узлов и тепловыми связями с другими узлами ЭТС.

Наибольший размах отмечен для пазовой и лобовых частей обмотки статора –  $(14 - 16)^\circ\text{C}$ . Это связано с наибольшим изменением мощности тепловыделения узлов 7, 8, 9 на интервалах  $T_H$  и  $T_X$ , в сравнении с другими узлами. Для обмотки статора основные и дополнительные потери, от высших

гармоник напряжения,  $(P_{els} + P_{elsv})$  – при переходе с интервала  $T_n$  на интервал  $T_x$  уменьшаются в 6,2 раза, для обмотки ротора потери  $(P_{elr} + P_{elrv})$  – в 2,2 раза, для сердечника статора потери  $(P_{mags} + P_{magsv})$  – в 1,6 раз [1]. Значения указанных потерь на интервалах  $T_n$  и  $T_x$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вид потерь \ Интервал	$T_n$	$T_x$
$P_{els}$ , Вт	896	60,7
$P_{elsv}$ , Вт	103	103
$P_{elr}$ , Вт	296	20,5
$P_{elrv}$ , Вт	211	211
$P_{mags}$ , Вт	317	193,2
$P_{magsv}$ , Вт	9,9	9,9

Независимость дополнительных электрических потерь от высших гармоник напряжения и от величины нагрузки существенно уменьшает размах колебаний температуры для обмоток статора и ротора, для сердечника статора уменьшение размаха связано с уменьшением дополнительных потерь от основной гармоники напряжения на интервале  $T_x$ . В результате, для обмотки ротора размах составляет  $5,5^\circ\text{C}$ , для сердечника статора –  $2,5^\circ\text{C}$ .

Используя средние для цикла значения температур в квазиустановившемся режиме, можно эквивалентировать перемежающийся режим S6 длительным режимом S1. Для этого воспользуемся зависимостями  $\theta_7 = f(P)$  и  $\theta_{14} = f(P)$  полученными при исследовании влияния величины полезной мощности двигателя на нагрев обмоток и сердечников статора и ротора при  $\gamma = \alpha = 1,0$  и ступенчатой форме напряжения. Эти зависимости представлены на рис. 5.

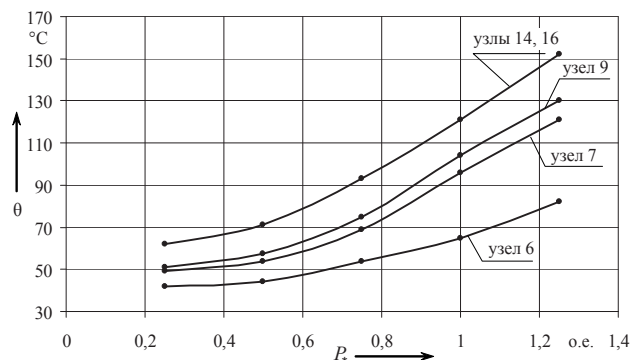


Рис. 5. Зависимость температуры обмоток и сердечников от полезной мощности  $P$  ступенчатая форма напряжения  $\alpha = \gamma = 1,0$ . Режим А

Среднее значение  $\theta_7 = 76,24^\circ\text{C}$  соответствует  $0,825P_N$ , этой же величине полезной мощности двигателя соответствует и средняя температура обмотки ротора –  $100,29^\circ\text{C}$ .

Используя предложенную математическую модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах можно эквивалентировать по нагреву длительным режимом S1, режимы S3, S4, S5, S6, S7, S8 при различной длительности цикла и продолжительности включения. Это позволит оптимально по мощности использовать двигатели с номинальным режимом S1 при работе в указанных выше режимах.

#### 4. Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При перемежающемся режиме S6 теплообмен частей двигателя на начальных циклах существенно отличается от теплообмена в квазиустановившемся режиме. В частности, возможно увеличение температуры на интервалах холостого хода, когда мощность тепловыделения узлов значительно уменьшается.
2. Размах колебаний температуры элементов конструкции двигателя, в пределах одного цикла в квазиустановившемся режиме при перемежающемся режиме S6 существенно ограничивается дополнительными электрическими и магнитными потерями от высших гармоник тока. Особенно велика их роль при регулировании по закону  $\gamma = \alpha$ , когда эти потери не зависят от величины нагрузки двигателя.
3. Используя предложенную математическую модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарном режиме можно эквивалентировать по нагреву длительным режимом S1 режимы S3 - S8, что позволит оптимально по мощности использовать двигатели с номинальным режимом S1 при их работе в указанных выше режимах.

#### Литература

1. Гуревич, Э.И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах [Текст] / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд – ние, 1983, – 216 с.
2. Осташевский, Н.А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в стационарных режимах [Текст] / Н.А. Осташевский, А.Н. Петренко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Тематический выпуск научно-технического журнала «Электронформ», – 2009, – С. 266.
3. Осташевский, Н.А. Потери частотно-управляемого асинхронного двигателя при различных законах регулирования и типах преобразователей частоты [Текст] / Н.А. Осташевский, В.Н. Иваненко, А.Н. Петренко // Электротехника и электромеханика. – 2009. – №3. – С. 37 – 41.
4. Кирьянов, Д.В. Mathcad14 [Текст] – СПб. : БХВ – Петербург, 2007. – 704 с.