

УДК 621.313

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАКЕТНОМ ОБРАЗЦЕ ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Г.К. Птах, С.С. Селюк*

*Птах Геннадий Константинович* – д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретическая электротехника и электрооборудование» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: ptah2003@list.ru

*Ptakh Gennady Konstantinovich* – Doctor of Technical Sciences, professor, department «Theoretical Electrical Engineering and Electrical» Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). E-mail: ptah2003@list.ru

*Селюк Сергей Степанович* – канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. E-mail: sss02@nm.ru

*Selyuk Sergey Stepanovich* – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, department «Applied Mathematics» Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). E-mail: sss02@nm.ru

*С помощью метода конечных элементов и программного комплекса ELCUT выполнен анализ изменения температурного поля в макетном образце вентильно-индукторного двигателя мощностью 15 кВт и частотой вращения 4000 мин<sup>-1</sup> в течение десятиминутного интервала времени.*

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, индукторный двигатель, анализ, тепловой процесс.

*Using the finite element method and software package ELCUT the analysis of the temperature field in the model sample Switched reluctance motor power of 15 kW and a rotation speed of 4000 min<sup>-1</sup> over a ten minute period of time.*

*Key words:* finite element method, switched reluctance motor, analysis, thermal process.

**П**РИ РЕШЕНИИ ряда специализированных задач индукторного электропривода с самовозбуждением возникает необходимость в разработке индукторного реактивного двигателя с повышенными электромагнитными и тепловыми нагрузками с целью снижения массогабаритных показателей, что требует на этапе проектирования выполнить расчёт тепловых процессов и оценить максимальную температуру обмотки двигателя, достигнутой за заданное время работы двигателя.

### Постановка задачи

При создании математической модели температурного поля (ТП) статора ВИРД-15-4000 использовались следующие допущения:

1) ТП двумерное; искомая температура  $T(M, t) = T(x, y, t)$ , где  $x, y$  – переменные декартовой системы координат;  $t$  – время;

2) материалы, из которых изготовлены элементы статора, однородные изотропные и при нагревании сохраняют свой объем; их характеристики: массовая плотность  $\rho$ , коэффициенты удельной теплопроводности  $\lambda$ , изохорной теплоёмкости  $c$  и удельной электрической проводимости  $\gamma$  остаются постоянными при любых значениях температуры в элементах статора;

3) теплообмен с окружающей и внутренней средой двигателя осуществляется по закону Ньютона;

4) контакт между магнитопроводом, шинами и изоляцией идеальный, воздушные прослойки отсутствуют;

5) на момент начала наблюдения за теплообменом считаем, что все элементы статора имеют температуру, равную температуре окружающей среды;

6) плотность тепловыделений в обмотке рассчитывается по действующему значению электрического тока;

7) потери в корпусе, зубце и ярме определяются согласно приближенным инженерным формулам.

Схематическое сечение статора приведено на рис. 1, а. Введены следующие обозначения:  $S_0$  – области, ограниченные конструктивными элементами статора (заполнены воздухом);  $S_1$  – корпус (материал – сталь 3);  $S_2, S_3$  – ярмо и зубцы (сталь 2212);  $S_4$  – клин для крепления обмоток (стеклотекстолит);  $S_5$  – обмотки двигателя.

Сечение статора является симметричной структурой. Поэтому в качестве расчетной области (рис. 1, б) выбран сектор раствора 15°.

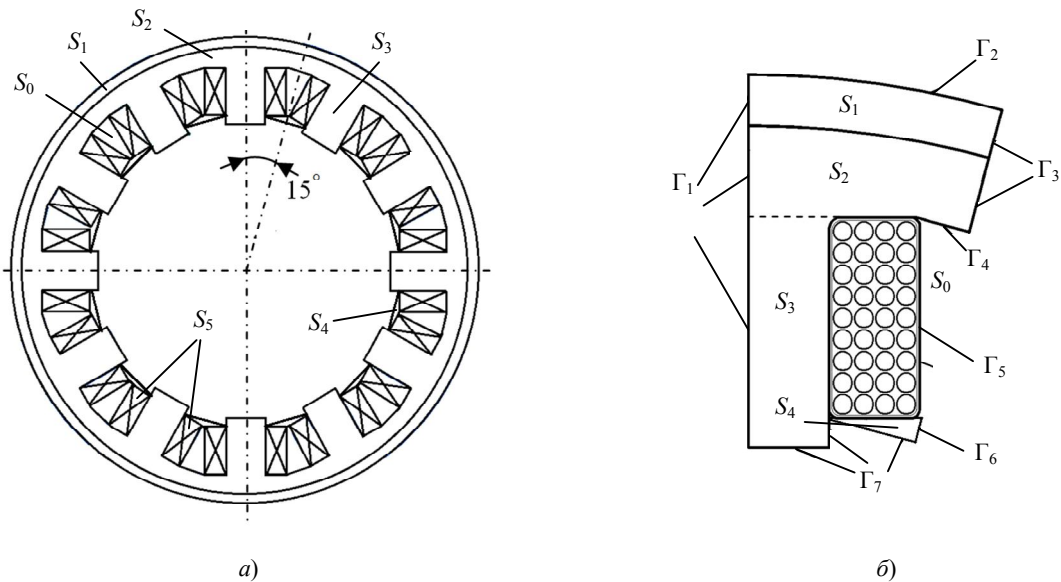


Рис. 1. Схематическое изображение элементов ВИРД-15-4000: а – сечение статора с обмотками и корпусом; б – область расчёта температурного поля

Укрупненный фрагмент сечения обмотки приведен на рис. 2. Внутри  $S_5$  введены подобласти:  $S_6$  – сечение проводника (медь);  $S_7$  – межвитковая изоляция (компаунд);  $S_8$  – внешняя изоляция обмотки (слоупласт).

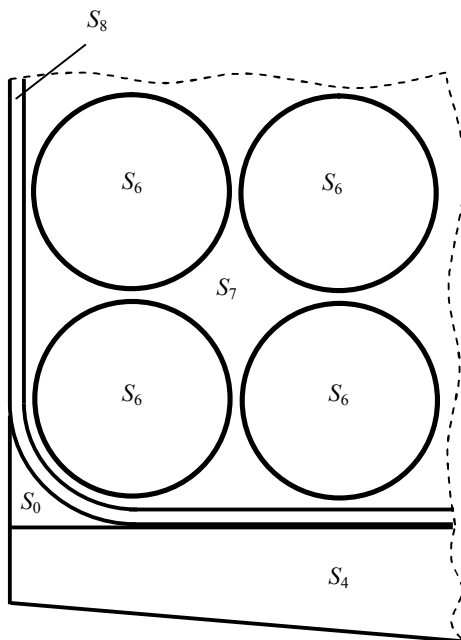


Рис. 2. Фрагмент обмотки и клина

### Математическая и компьютерная модель тепловых процессов

Передача тепла в расчетной области описывается уравнением [1]

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad}(T(M, t))) + Q_k(M) = c_p T_t(M, t), \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, 6,$$

где  $Q_1(M)$ ,  $M \in S_1$ ,  $Q_2(M)$ ,  $M \in S_2$ ,  $Q_3(M)$ ,  $M \in S_3$  – удельные плотности потерь мощности в корпусе двигателя, яме и зубце статора;

$Q_6(M) = \frac{|\delta(M)|^2}{\gamma}$ ,  $M \in S_6$  – удельная объемная плотность Джоулевых потерь в проводах обмотки («объемная плотность тепловыделений» в терминах *ELCUT*);  $\delta(M)$  – действующее значение плотности тока в проводах.

Теплообмен с окружающей средой через границу  $\Gamma_2$  (конвективный) и внутренней частью двигателя через границу  $\Gamma_7$  (обеспеченный вращением ротора) происходит по закону

$$-\lambda \frac{\partial T(M, t)}{\partial n} = \alpha (T(M, t) - T_{\text{окр}}), \quad (2)$$

где  $T_{\text{окр}}$  – температура окружающей среды;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена с ней (определялся согласно [1]).

На границах  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_3$  и  $\Gamma_6$ , являющихся отрезками осей симметрии, а также на границах  $S_0$ , допустим отсутствие нормального потока тепла. Это учитывается однородным условием Неймана (частный случай (2),  $\alpha = 0$ ):

$$\frac{\partial T(M, t)}{\partial n} = 0. \quad (3)$$

Начальное условие, согласно допущению, имеет вид

$$T(M, t_0) = T_{\text{окр}}, \quad (4)$$

где  $t_0$  – момент времени, с которого началось наблюдение за теплообменом.

Решение краевой задачи (1) – (4) для расчетной области реализовано в программном комплексе *ELCUT*. Геометрическая модель приведена на рис. 3.

Список меток блоков и ребер, используемых в компьютерной модели, приведен на рис. 4.

Введены блоки, описывающие физические свойства элементов конструкции, со следующими метками:

1) «Компаунд» – изоляционный материал с параметрами  $\rho=526,32 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=0,045 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=1,5 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

2) «Медь» – медная шина с параметрами  $\rho=8900 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=389,6 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=108,78 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

3) «Слюдопласт» – изоляционный материал ИФГ-КАХФ с параметрами  $\rho=1400 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=0,3 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=1470 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

4) «Сталь 2212 Зубец», «Сталь 2212 Ярмо» – магнитопроводы с параметрами  $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=45,4 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=470 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ; в каждом блоке задается своя объемная плотность тепловыделений;

5) «Сталь 3» – магнитопровод с параметрами  $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=45,4 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=470 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

6) «Текстолит» – изоляционный материал с параметрами  $\rho=1400 \text{ кг/м}^3$ ,  $\lambda=0,3 \text{ Вт/(К}\cdot\text{м)}$ ,  $c=1470 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

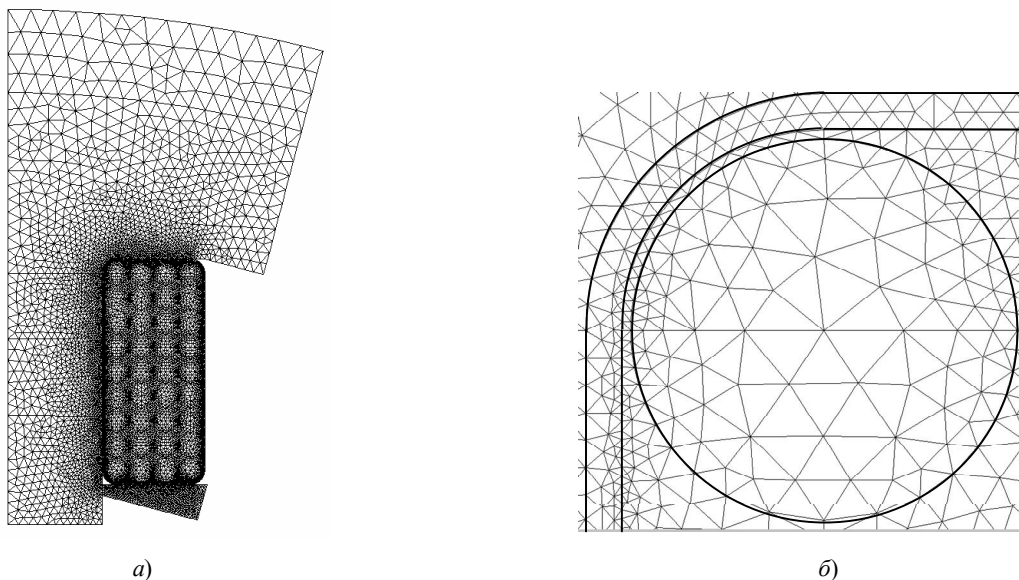


Рис. 3. Триангуляция области расчета (геометрическая модель *ELCUT*): а – конечно-элементное разбиение (10 574 узла); б – фрагмент разбиения обмотки

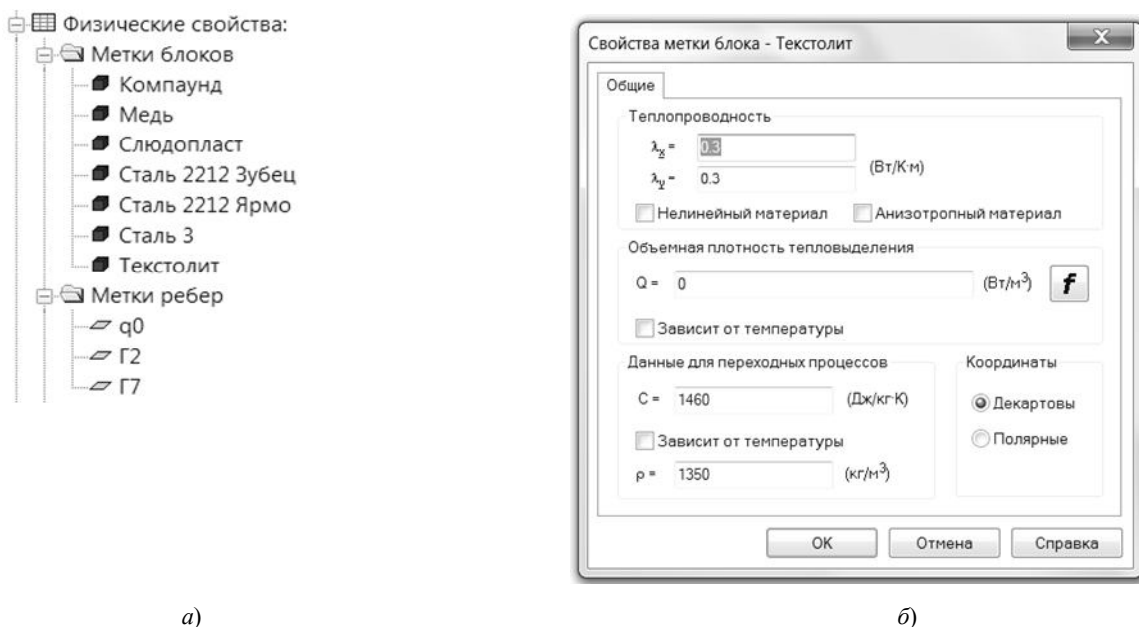


Рис. 4. Описание физических свойств в модели *ELCUT*: а – список меток; б – метка блока «Текстолит»

Введены рёбра, описывающие условия на границах блоков, со следующими метками:

1) «Г2» и «Г7» – определяют теплообмен на границах  $\Gamma_2$  и  $\Gamma_7$  согласно (2) с параметрами  $T_{\text{окр}} = 25^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{\Gamma_2} = 7,9 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$  и  $\alpha_{\Gamma_7} = 51 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$ ;

2) «q0» – определяет условие теплоизоляции (3) на границах  $S_0$ .

### Результаты моделирования тепловых процессов

Распределение температурного поля в обмотке, выполненной из круглого провода, после десяти минут работы показано на рис. 5. В точке  $N$  достигается максимальное значение температуры.

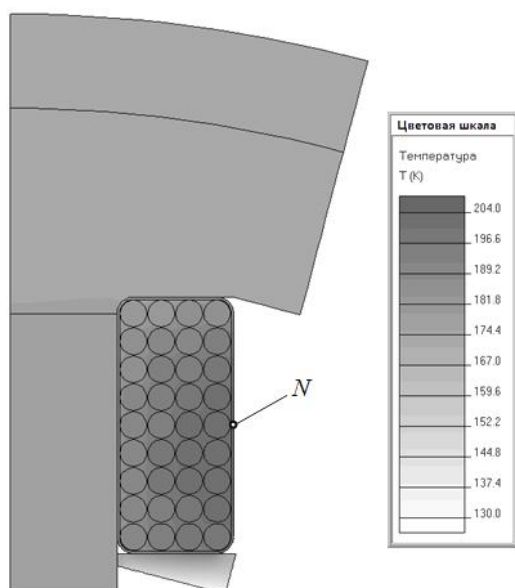


Рис. 5. Распределение температурного поля после 10 мин работы ВИРД-15-4000

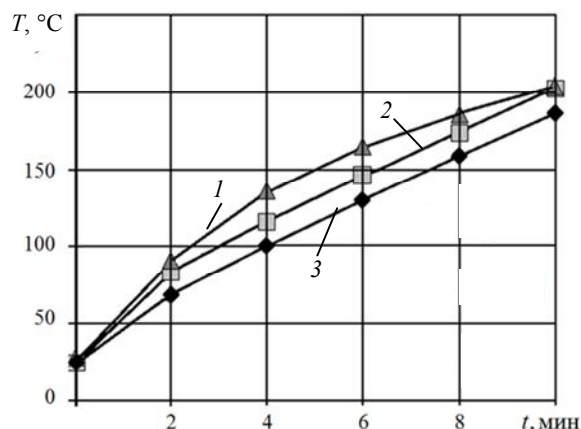


Рис. 6. Зависимости температуры в обмотке ВИРД-15-4000 от времени: 1 –  $T_3(t)$ ; 2 –  $T(N, t)$ ; 3 –  $T_c(t)$

На рис. 6 приведены расчётные графики максимальной температуры  $T(N, t)$  в точке  $N$  и средней по сечению обмотки температура  $T_c(t)$ , а также экспериментальная зависимость температуры  $T_3(t)$  в точке  $N$  [2].

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания на проведение НИОКР, шифр заявки №7.1604.2011.

Программный комплекс ELCUT предоставлен ООО «ТОР», г. Санкт-Петербург в рамках государственной программы поддержки вузов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М.: ВШ, 1989. 240 с.
2. Птах Г.К., Яковенко А.Е, Гуммель А.А. и др. Макетный образец вентильно-индукторного электропривода с повышенными электромагнитными нагрузками // Изв. вузов. Электромеханика. 2014. № 1. С. 67 – 70.