

## **Математическая модель тепловых процессов в моментных двигателях**

О.В. Горячев, С.В. Минчук

### **Аннотация**

Рассмотрена методика формирования тепловой модели электрического двигателя основанная на решении задачи нестационарной теплопередачи методом конечных элементов (МКЭ). Предложено идентифицировать параметры линейной тепловой модели посредством анализа решения задачи нестационарной теплопередачи МКЭ.

### **Ключевые слова**

бесконтактный моментный двигатель; тепловая модель; форсированный режим работы

### **Введение**

Важным фактором при синтезе электропривода является анализ тепловых режимов работы исполнительного двигателя (ИД), особенно это актуально при сильных перепадах внешних температур ( $T_{oc}$ ), наличие посторонних источников нагрева, форсированном режиме работы двигателя. Так как обмотки статора являются основным источником тепловыделения и одновременно их работоспособность критична к температуре, то выходным параметром тепловой модели целесообразно выбирать именно температуру обмоток.

Для учета влияния всего многообразия факторов таких как нелинейность, нестационарность свойств материалов, особенностей конструкции машины и т.д. решение задачи теплопередачи может быть осуществлено расчетом теплового поля электрической машины. Расчет теплового поля может быть произведен на основе схемы замещения магнитной цепи, однако перспективным и наиболее целесообразным является расчет теплового поля исследуемой электрической машины методом конечных элементов. Решение стационарной задачи теплообмена методом конечных элементов (МКЭ) полезно только для анализа электрической машины и не может быть непосредственно применено для моделирования динамических процессов. В работах [1], [2], [4] рассмотрен подход к

идентификации параметров упрощенной линейной тепловой модели по переходным процессам нагрева охлаждения обмоток электрической машины полученным экспериментально. Такой подход позволяет получить достаточно точную тепловую модель обмоток статора. Решение задачи нестационарной теплопередачи МКЭ упростить определение переходных процессов нагрева охлаждения обмоток исследуемого двигателя по сравнению с экспериментом.

Распределение температуры во внутреннем пространстве двигателя определяется тепловым полем в продольных и поперечим плоскостях. При формировании модели основанной на решении задачи нестационарной теплопередачи плоскопараллельного температурного поля МКЭ были приняты следующие допущения:

- 1) тепловыми процессами в лобовых частях обмоток пренебрегаем;
- 2) теплопередача во внешнюю среду осуществляется через внешнюю поверхность корпуса и в воздушный зазор через поверхность расточки статора;
- 3) в поперечном сечении двигателей отсутствует перетекание тепла, что позволяет решать плоскую задачу в продольном сечении;
- 4) в поперечном сечении обмотки температуры отдельных проводников равны средней температуре в рассматриваемом сечении;
- 5) тепловыми потоками через вал пренебрегаем;
- 6) условия охлаждения стационарны;
- 7) материалы исследуемого двигателя и воздух имеют линейные (не зависящие от температуры) и изотропные в плоскости решения свойства теплопроводности и теплоемкости для рабочих температур частей двигателя;
- 8) скорость протекания электромеханических процессов много больше скорости протекания тепловых процессов.

Формировании тепловой модели обмоток статора целесообразно проводить посредством идентификации параметров упрощенной линейной тепловой модели по переходным процессам нагрева охлаждения обмоток электрической машины полученным серийным решением задачи нестационарной теплопередачи МКЭ для различных токов обмоток, условий теплоотдачи и т.д.

Тепловую модель обмоток можно представить в виде аperiodического звена входным сигналом которого является ток статора ( $i_s$ ), а выходным температура обмоток ( $T_{об}$ ) [2]:

$$T_{об}(p) = \frac{k_t}{T_t p + 1} \cdot i_s(p) + T_{oc},$$

где  $T_{oc}$  – температура окружающей среды,  $T_t$  – постоянная времени нагрева обмоток статора,  $k_t$  – коэффициент усиления модели по току статора  $i_s$ .

Переменными параметрами модели будут являться коэффициент усиления  $k_t$  и постоянная времени  $T_t$ , как функции от  $i_s$ . На рис. 1 представлена структурная схема тепловой модели ИД.

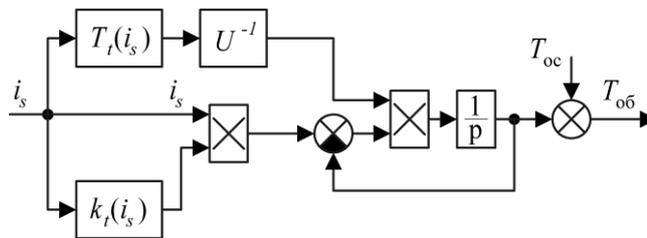


Рис. 1. Структурная схема тепловой модели ИД

Рассмотрим методику определения параметров модели  $k_t(i_s)$  и  $T_t(i_s)$  для рассматриваемого ИД ДБМ70-0.16-1.5-2 при помощи численного расчета нестационарного теплового поля МКЭ. Блок-схема формирования тепловой модели представлена на рис. 2. Первым этапом является создание геометрической модели (структуры поперечного сечения ИД). При этом каждому блоку присваиваются те или иные свойства. Для решения поставленной задачи необходимо задать следующие свойства геометрической модели: теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ , плотность материала  $\rho$  и объемная плотность тепловыделения  $Q$ .

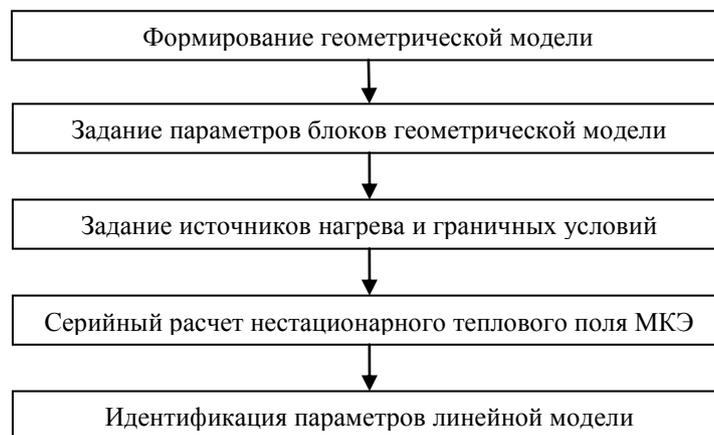


Рис. 2. Блок-схема формирования тепловой модели.

Особенности задания свойств теплопроводности наиболее часто встречающихся блоков электрических машин: шихтованных сердечников, выпных обмоток и замкнутых газовых полостей рассмотрены в работе [3]

Определившись со свойствами и геометрией блоков входящих в состав геометрической модели рассмотрим источники нагрева ИД характеризующиеся объемной

плотностью тепловыделения. Наибольшее тепловыделения характерно для обмоток. Основным источником нагрева являются Джоулевы потери.

$$Q_w(t_s) = \frac{P_w}{V_w} = \frac{t_s^2 \cdot R_\phi}{V_w},$$

где  $Q_w$  – объемная плотность тепловыделения обмоток (т.к. скорость протекания электромеханических процессов много больше скорости протекания тепловых процессов можно считать что во всех обмотках протекает средний ток  $i_s$ );  $V_w$  – объем обмоток.

Так же объемную плотность тепловыделения будут иметь материалы статора и ротора вследствие магнитных потерь в них. Их можно определить решив связанную магнитостатическую задачу.

Для полного определения задачи необходимо сформировать граничные условия на корпусе ИД. Условия теплопередачи корпуса ИД можно определить конвекцией с заданными коэффициентом теплоотдачи и температурой окружающей среды определяемыми конструктивными параметрами изделия в которое встроен ИД.

На рис. 3 представлен результат расчета установившегося теплового поля ИД МКЭ для среднего тока обмоток равного 2, А (стрелками показано направление теплового потока). На рис. 4 – график иллюстрирующий решение задачи нестационарной теплопередачи методом конечных элементов (зависимость температуры обмоток статора от времени при среднем токе равном 1 А).

Далее для определения параметров тепловой модели (коэффициента усиления  $k_t$  и постоянной времени  $T_t$ ) необходимо провести серию численных расчетов нестационарного теплового поля МКЭ при различных токах статора.

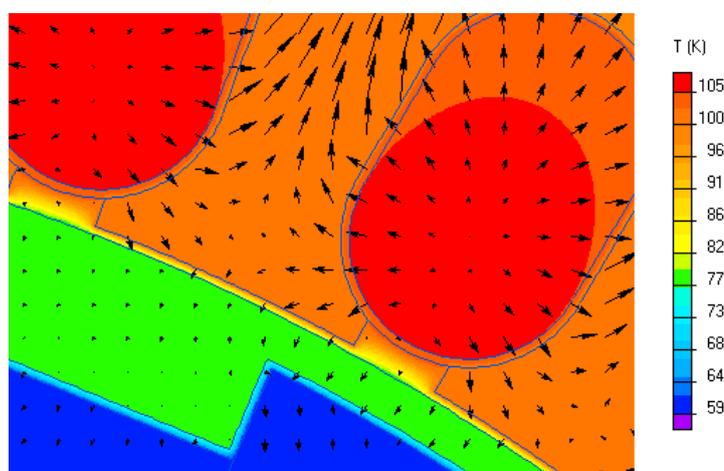


Рис. 3. Результат расчета установившегося теплового поля ИД.

На рис. 4 представлен один из серии расчетов. Полученные переходные процессы по температуре обмоток необходимо проанализировать с целью идентификации параметров модели при данном  $i_s$ . Идентификация заключается в расчете коэффициента усиления  $k_t$  как отношения установившейся температуры к току статора и постоянной времени  $T_t$  как времени достижения температурой обмоток 0.67 от установившейся величины. Проведя серийные расчеты нестационарного теплового поля и идентифицировав параметры были получены зависимости  $k_t(i_s)$  и  $T_t(i_s)$  для рассматриваемого ИД ДБМ70-0.16-1.5-2 с заданными граничными условиями (рис. 5).

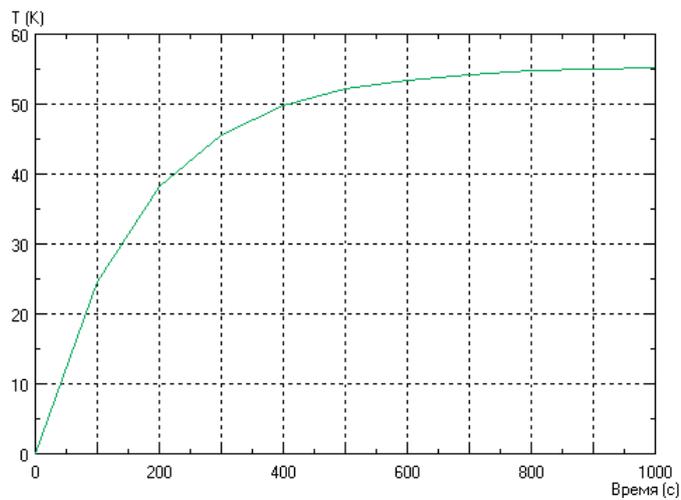


Рис. 4. Зависимость температуры обмоток статора от времени

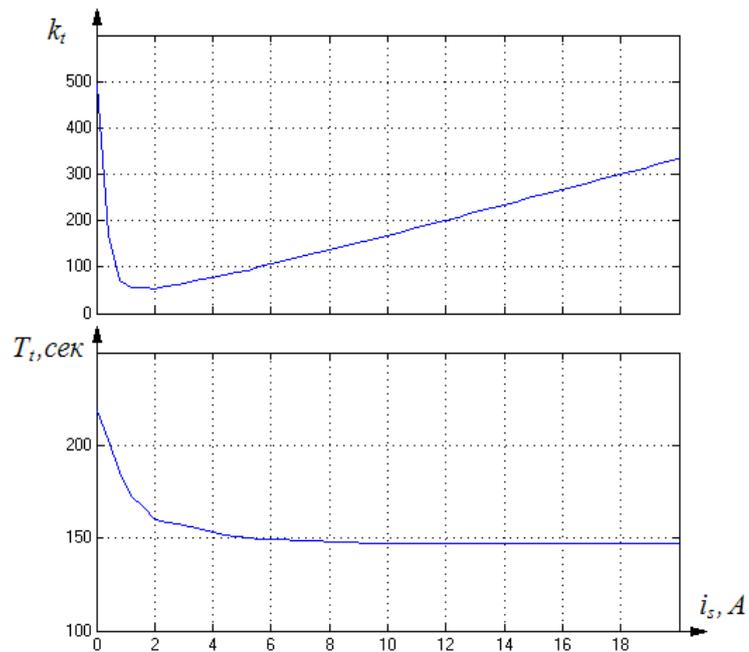


Рис. 5. Зависимости  $k_t(i_s)$  и  $T_t(i_s)$  для ИД ДБМ70-0.16-1.5-2

В заключении можно сделать вывод, что сформированная тепловая модель позволяет адекватно оценивать температуру обмоток ИД в процессе моделирования его работы. Рассмотренная методика формирования тепловой модели электрического двигателя основанная на решении задачи нестационарной теплопередачи методом конечных элементов может быть успешно применена для широкого спектра электрических машин.

### **Библиографический список**

1. Wallerand Faivre d'Arcier, Laurent Serillon. Thermal Modelling of Permanent Magnet Motor for Traction. Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm. 2007. 47 p.
2. Zocholl S.E., Benmouyal G. Using thermal limit curves to define thermal models of induction motors // Proceedings of the 28th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 23-25, 2001.
3. Гандшу В.М. Особенности расчета нагревания электромагнитных устройств с помощью пакета программ ELCUT // Elcut. URL: <http://elcut.ru/articles/>
4. Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 216с.

### **Сведения об авторах**

Горячев Олег Владимирович, заведующий кафедрой Тульского государственного университета, профессор, д.т.н.

ТулГУ, пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012;

тел.: (4872)35-38-35; e-mail: [info@sau.tsu.tula.ru](mailto:info@sau.tsu.tula.ru)

Минчук Сергей Викторович, аспирант Тульского государственного университета.

ТулГУ, пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012;

e-mail: [minchuk@programist.ru](mailto:minchuk@programist.ru)