

А.А. Пугачев, С.В. Морозов, А.С. Морозов
(г. Брянск, Брянский государственный технический университет)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN INDUCTION MOTOR

Приведена эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя, показаны уравнения теплового равновесия. Проанализированы результаты моделирования для двигателя мощностью 14 кВт при управлении им по скалярному закону.

The equivalent thermal circuit of an induction motor is considered, the equations of thermal balanced are shown on the basis of the voltage nodes technique. The results of the simulation of the 14 kW induction motor with scalar control are discussed.

Ключевые слова: тепловые процессы, эквивалентная схема замещения, асинхронный двигатель.

Keywords: thermal processes, equivalent circuit, induction motor.

Несмотря на относительно большое количество работ в области исследования теплового состояния асинхронного двигателя [1, 2], это направление не утратило своей актуальности. Для прогнозирования теплового состояния асинхронного двигателя в период его эксплуатации необходима применение оригинальной, синтезированной для исследуемого вида асинхронного двигателя, математической модели. Верификация результатов, полученных на математической модели, должна проходить по данным, полученным во время экспериментальных исследований на аналогичном двигателе или на его физической модели.

Для решения задачи расчета и исследования распределения температур в различных элементах асинхронного двигателя была синтезирована математическая модель тепловых процессов в стационарных режимах работы. Двигатель здесь представлен в виде нелинейного замкнутого теплового объекта, в котором тепловые потоки через пассивные элементы (не выделяют тепловых потерь) – станину, вал и т. д. – перераспределяются между активными элементами двигателя (выделяют тепловые потери), потери в которых определяются, в том числе, их температурой. Теплообмен между станиной и окружающим воздухом в модели учтен в виде уравнений свободной конвекции и теплового излучения. Полученная модель основана на методе эквивалентных тепловых схем, который обеспечивает решение задачи по исследованию распределения температур в установившихся режимах работы в выбранном конечном количестве элементов двигателя.

Синтезированная математическая модель асинхронного двигателя позволяет определить значения температур в десяти элементах асинхронного двигателя (рис. 1), включая и температуры охлаждающего воздуха на входном участке воздушного потока. Тепловые процессы в ней для каждого узла определяются уравнениями теплового баланса, теплопередачи к охлаждающему воздуху и теплопроводности к соседним элементам.

Использованы две математические модели тепловых процессов в цилиндрических телах, определяющие значения трех температур каждая. Одна модель представляет собой решение уравнений теплопроводности в радиальном, другая – в осевом направлениях. В каждой модели потенциалы двух узлов эквивалентны температурам на соответствующих поверхностях, а потенциал третьей точки эквивалентен средней температуре всего цилиндрического элемента. Тепловые потери активных элементов введены в узел схемы, потенциал которой эквивалентен средней температуре. Для определения тепловых сопротивлений математической модели нужно иметь информацию о геометрических размерах каждого элемента, а также значения теплопроводностей как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Синтезированная эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя показана на рис. 2. Подстрочными индексами обозначены номера элементов (в соответствии с рис. 1), сопротивлением тепловому потоку между которыми является R .

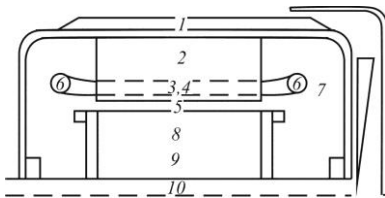


Рис. 1. Эскиз асинхронного двигателя:

- 1 – корпус, 2 – сердечник статора,
- 3 – зубцы статора, 4 – обмотка статора,
- 5 – воздушный зазор,
- 6 – лобовая часть обмотки статора, 7 – воздух у подшипниковых крышек,
- 8 – обмотка ротора, 9 – сердечник ротора, 10 – вал

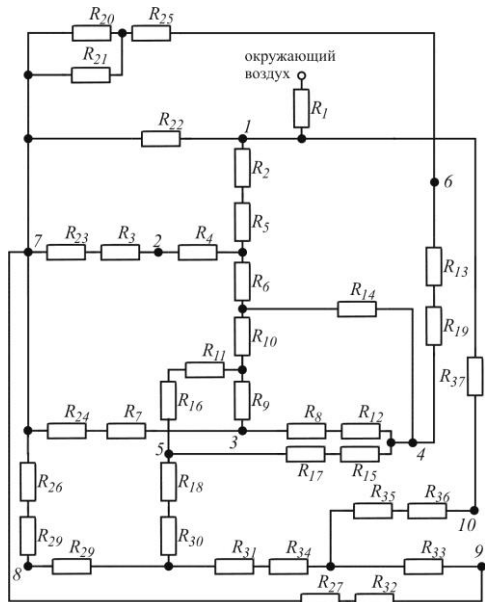


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема замещения асинхронного двигателя

Активными с точки зрения тепловых потерь в модели (рис. 1) являются сердечник статора 2, зубцы статора 3, обмотка статора 4, лобовая часть обмотки статора 6, стержни ротора 8 и сердечник ротора 9. Определение тепловых потерь мощности в различных элементах на основании эквивалентной схемы замещения асинхронного двигателя, описывающей переходные электромеханические процессы в асинхронном двигателе, осуществлено на основании результатов работы [3]. При определении потерь мощности были приняты во внимание такие нелинейные явления и эффекты, возникающие при работе двигателя, как насыщение по главному магнитному пути, вытеснение тока ротора, зависимость потерь мощности в стали от частоты тока статора.

В результате синтеза эквивалентной тепловой схемы замещения было получено уравнение теплового равновесия:

$$\theta = G^{-1}P,$$

где θ – матрица перегрева отдельных узлов двигателя, G – матрица теплопроводностей между узлами, P – матрица мощностей греющих потерь. Матрица G имеет размерность $[10 \times 10]$, матрицы θ и P – $[10 \times 1]$.

В качестве исследуемого двигателя выбран двигатель мощностью 14 кВт [14].

Результаты расчета мощности потерь приведены в таблице 1. Расчет произведен для электропривода, обеспечивающего выполнение закона частотного управления $u_s/f_s = \text{const}$, где u_s – напряжение обмотки статора, f_s – частота тока статора. В таблице 1 приняты обозначения: $u_s^* = u_s/u_{s, \text{ном}}$, $f_s^* = f_s/f_{s, \text{ном}}$ – относительные значения напряжения и частоты тока статора, $\omega^* = \omega/\omega_{0, \text{ном}}$, $M^* = M/M_{\text{ном}}$ – относительные значения частоты вращения вала ротора и момента, $V_{\text{ов}}^* = V_{\text{ов}}/V_{\text{ов, ном}}$ – относительная скорость охлаждающего воздуха, индекс "ном" соответствует номинальному значению указанной величины. Значения частоты тока статора f_s^* соответствуют частоте тока тягового генератора в функции текущей позиции контроллера машиниста маневрового тепловоза.

Таблица 1. Результаты расчета мощности потерь

№	f_s^*	u_s^*	ω^*	M^*	$V_{\text{ов}}^*$	ΔP_2 , Вт	ΔP_3 , Вт	ΔP_4 , Вт	ΔP_6 , Вт	ΔP_8 , Вт	ΔP_9 , Вт
1	1	1	0,9	1	1	90,1	150,4	310,8	305,1	460,1	21,9
2	1	1	0,86	1,5	1	87,5	149,7	485,1	473,9	721,8	35,8
3	0,5	0,5	0,43	1	0,45	50,4	106,7	322,7	323,8	483,9	17,9
4	0,25	0,25	0,24	1	0,2	39,75	72,2	323,6	336,3	512,7	9,9

Результаты расчета перегрева узлов двигателя АО-63-4 приведены в табл. 2.

В результате расчетов установлено, что для выбранного типа двигателя наибольший перегрев испытывает обмотка ротора (стержни ротора). Наиболее нагретыми элементами статора являются пазовая и лобовая части обмотки,

причем значения нагрева отличаются незначительно, точное положение наиболее нагретой точки является функцией скорости охлаждающего воздуха, параметров напряжения статора и нагрузки на валу. Отметим, что при независимом способе охлаждения расположение и температура наиболее нагретого узла от частоты вращения вала ротора зависят пренебрежимо мало.

Таблица 2. Результаты расчета перегрева узлов двигателя АО-63-4

№	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$\theta_3, ^\circ\text{C}$	$\theta_4, ^\circ\text{C}$	$\theta_5, ^\circ\text{C}$	$\theta_6, ^\circ\text{C}$	$\theta_7, ^\circ\text{C}$	$\theta_8, ^\circ\text{C}$	$\theta_9, ^\circ\text{C}$	$\theta_{10}, ^\circ\text{C}$
1	86,8	130,7	130,3	131,8	131,3	113,4	98,9	132,1	131,4	109,3
2	126,7	189,2	191,0	189,8	191,5	165,6	144,4	192,7	191,8	159,5
3	84,7	147,6	149,2	148,4	149,7	131,8	105,8	150,7	149,9	117,6
4	83,9	171,9	173,6	173,3	174,7	157,2	116,6	175,8	174,8	129,8

При работе на низких позициях контроллера машиниста расход охлаждающего воздуха значительно ниже номинального значения, что приводит к повышенному нагреву. Значения температуры обмоток асинхронного двигателя в этих режимах оказывают сильное влияние на показатели качества всего электропривода. Из таблицы 2 очевидно, что на низких позициях контроллера машиниста обмотки работают на максимальных значениях температуры изоляции. При увеличении моментов выше номинального значения, что является нормальным при пуске явлением, обмотки подвергаются тепловым нагрузкам выше допустимых по классу изоляции. При движении на затяжных подъемах на низких скоростях при большом весе состава, когда продолжительность работы под действием больших моментов становится сопоставима с постоянной нагрева, температура изоляции достаточно длительное время превышает допустимое значение, что ведет к ее ускоренному старению.

Список литературы

1. Пугачев, А.А. Анализ и систематизация методов и результатов определения температуры теплонагруженных узлов асинхронного тягового двигателя железнодорожного транспорта / А.А. Пугачев // Мир транспорта и технологических машин, № 3. – 2012. – С. 39 – 49.
2. Космодамянский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов : дисс. ... доктора технических наук / А.С. Космодамянский // дисс... докт. техн. наук. – Москва, 2002. – 306 с.
3. Космодамянский, А.С. Моделирование электропривода с асинхронным двигателем в режиме минимума мощности потерь / А.С. Космодамянский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев // Электротехника. – 2012. – № 12. – С. 26 – 31.
4. Воробьев, В.И. Математическая модель установившихся тепловых процессов в асинхронном двигателе / В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 5. – 2 (313). – 2015. – С. 221 – 226.

Материал поступил в редколлегию 19.10.20.