

ЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.313.333.2:519.711.2

Омельченко Е.Я., Агапитов Е.Б., Моисеев В.О.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Разработана 4-массовая термодинамическая математическая модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и самовентиляцией, методика расчета коэффициентов теплопередачи между отдельными массами модели. Проведены исследования работы модели, выполненной в программе MATLAB.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, термодинамическая модель, методика расчета.

Developed a 4-mass thermodynamic mathematical model of induction motor with squirrel cage rotor and self venting. A method for calculating heat transfer coefficients between the individual masses of the model. The studies of the model, made in the program MATLAB.

Key words: induction motor, thermodynamic model, method for calculating.

Температура обмоток, магнитопровода и элементов двигателей является ограничивающим фактором при их эксплуатации. Известны двухмассовые [1], трехмассовые [2] термодинамические модели двигателей, позволяющие рассчитывать температуру обмоток и элементов двигателя при различных механических нагрузках и скоростных режимах. Для уточненной проверки элементов двигателя по нагреву, исследованию нестационарных тепловых процессов, учитывая реальное распределение температур и тепловых потоков, предлагается четырехмассовая термодинамическая математическая модель закрытого асинхронного двигателя, которая, в свою очередь, может быть использована в более сложных моделях, например в статической математической модели электропривода.

Каждая выделенная масса представляется однородным телом со своей теплоемкостью и бесконечно большой внутренней теплопроводностью с равномерным распределением температуры по всему объему:

1. Корпус, вал двигателя и магнитопровод статора.

Материал – чугунное или алюминиевое литье и электротехническая сталь. Внутренняя теплогенерация определяется механическими потерями, потерями в стали статора и зависит от скоростного режима работы и способа управления напряжением статорной обмотки. Теплоотдача в виде конвекции и теплопередачи направлена в окружающую среду, зависит от температуры окружающей среды, внешней поверхности и способа охлаждения двигателя. Теплоприем в виде теплопередачи направлен к магнитопроводу от обмотки статора и от магнитопровода ротора к валу и корпусу двигателя.

2. *Обмотка статора.* Материал – медь. Внутренняя теплогенерация определяется электрическими потерями, зависит от тока статора и температуры обмотки. Теплоотдача в виде теплопередачи направлена от обмотки к магнитопроводу и теплоприем в виде конвекции и теплопередачи от обмотки ротора к обмотке статора.

3. *Обмотка ротора.* Материал – медь или алюминий. Внутренняя теплогенерация определяется электрическими потерями, зависит от тока ротора и

температуры обмотки. Теплоотдача в виде теплопередачи направлена от обмотки к магнитопроводу и в виде конвекции и теплопередачи направлена от обмотки ротора к обмотке статора.

4. *Магнитопровод ротора.* Материал – электротехническая сталь. Внутренняя теплогенерация определяется дополнительными потерями и потерями в стали ротора, зависит от просадки скорости. Теплоприем в виде теплопередачи направлен к магнитопроводу от обмотки ротора, а теплоотдача в виде теплопередачи направлена от магнитопровода к валу и корпусу двигателя.

Принимаются допущения:

– мощность теплового потока от корпуса двигателя (первая тепловая масса) в окружающую среду пропорциональна разности температур в первой степени и остальные массы для двигателя закрытого исполнения с окружающей средой не связаны;

– мощность теплового потока от одной массы к другой пропорциональна разности температур в первой степени.

При этих условиях и допущениях разработана схема тепловых потоков (рис. 1), в которой выделены потоки внутренней теплогенерации (светлые стрелки) и потоки теплопереноса между массами (темные стрелки). В соответствии со схемой тепловых потоков система дифференциальных уравнений теплового баланса четырехмассовой тепловой модели закрытого асинхронного двигателя может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Theta_1}{dt} &= (\Delta P_{1C} + \Delta P_{MEK} - A_{10}(\Theta_1 - \Theta_0) + \\ &+ A_{21}(\Theta_2 - \Theta_1) + A_{41}(\Theta_4 - \Theta_1)) / C_1; \\ \frac{d\Theta_2}{dt} &= (\Delta P_{1M} - A_{21}(\Theta_2 - \Theta_1) + A_{32}(\Theta_3 - \Theta_2)) / C_2; \\ \frac{d\Theta_3}{dt} &= (\Delta P_{2M} - A_{32}(\Theta_3 - \Theta_2) - A_{34}(\Theta_3 - \Theta_4)) / C_3; \\ \frac{d\Theta_4}{dt} &= (\Delta P_{2C} + \Delta P_0 + A_{34}(\Theta_3 - \Theta_4) - A_{41}(\Theta_4 - \Theta_1)) / C_4; \end{aligned} \right\} (1)$$

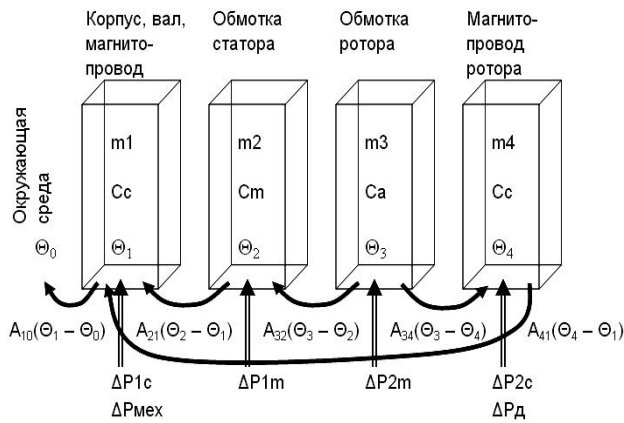


Рис.1. Схема тепловых потоков АД с самовентиляцией

В уравнениях (1): Θ_i и C_i – температура и теплоемкость i массы; A_{ij} – коэффициент теплопередачи от i массы к j массе; A_{10} – коэффициент теплоотдачи от первой массы (корпус двигателя) в окружающую среду; Θ_0 – температура окружающей среды. Теплоемкость i элемента тепловой модели определяется его удельной теплоемкостью и массой $C_i = c_i m_i$. Суммарная теплоемкость двигателя равна сумме i теплоемкостей.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) представляется в виде системы интегральных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{1}{C_1} \int (\Delta P_{1c} + \Delta P_M - \Theta_1(A_{10} + A_{21} + A_{41}) + \Theta_0 A_{10} + \Theta_2 A_{21} + \Theta_4 A_{41}) dt + \Theta_0; \\ \Theta_2 &= \frac{1}{C_2} \int (\Delta P_{1m} - \Theta_2(A_{21} + A_{32}) + \Theta_1 A_{21} + \Theta_3 A_{32}) dt + \Theta_0; \\ \Theta_3 &= \frac{1}{C_3} \int (\Delta P_{2m} - \Theta_3(A_{32} + A_{34}) + \Theta_2 A_{32} + \Theta_4 A_{34}) dt + \Theta_0; \\ \Theta_4 &= \frac{1}{C_4} \int (\Delta P_{2c} + \Delta P_D - \Theta_4(A_{34} + A_{41}) + \Theta_3 A_{34} + \Theta_1 A_{41}) dt + \Theta_0. \end{aligned} \right\} (2)$$

В соответствии с системой уравнений (2) разработана структурная схема математической тепловой модели АД (рис. 2), в которой входными переменными в качестве тепловых потоков внутренней теплогенерации выступают потери АД, а выходными переменными являются температуры выделенных масс. Начальные значения интегрирующих звеньев задаются равными температуре окружающей среды Θ_0 (пуск холодного двигателя) или другими значениями, определяемыми задачей исследования.

Система уравнений (1) включает в себя 4 уравнения теплового баланса, по которым необходимо рассчитать 5 коэффициентов теплопередачи. Для установившегося номинального режима ($t \rightarrow \infty; d/dt \rightarrow 0$) на основании данных класса обмоток по температуре, опыта работы и номинальных данных достаточно задать установившимися значениями температур каждой массы Θ_{iy} , и определить рациональное соотношение между двумя коэффициентами теплопередачи. В связи с этим формулы расчета коэффициентов теплопередачи принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} A_{10} &= \Delta P_{\Sigma} / (\Theta_{1Y} - \Theta_0); \\ A_{41} &= 0,1 A_{10}; \\ A_{21} &= (A_{10}(\Theta_{1Y} - \Theta_0) - A_{41}(\Theta_{4Y} - \Theta_{1Y}) - \Delta P_{1c} - \Delta P_{MEX}) / (\Theta_{2Y} - \Theta_{1Y}); \\ A_{32} &= -(\Delta P_{1m} - A_{21}(\Theta_{2Y} - \Theta_{1Y})) / (\Theta_{3Y} - \Theta_{2Y}); \\ A_{34} &= (\Delta P_{2m} - A_{32}(\Theta_{3Y} - \Theta_{2Y})) / (\Theta_{3Y} - \Theta_{4Y}). \end{aligned} \right\} (3)$$

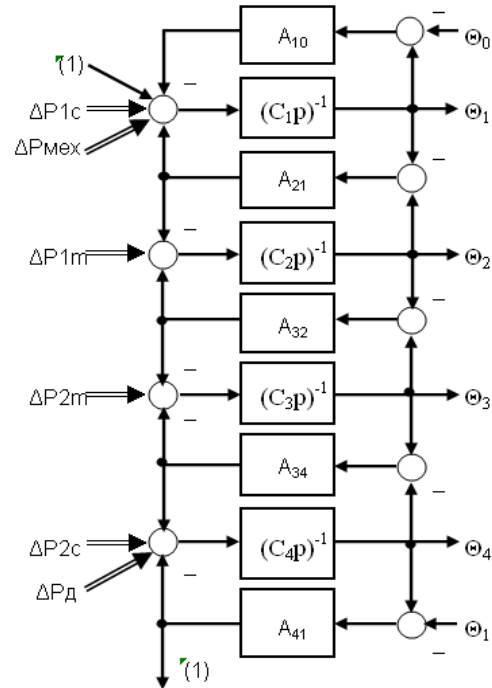


Рис.2. Структурная схема четырехмассовой тепловой модели АД

В результате несложных преобразований структурной схемы рис. 2 в программной среде *MATLAB* разработана расчетная структурная схема тепловой модели *Тепло4ад* (рис. 3), позволяющая выполнять расчет переходных процессов температур выделенных масс АД при изменении всех составляющих потерь и температуры окружающей среды. Дополнительно в модели учитывается способ охлаждения двигателя и для сравнения моделируются переходные процессы в одномассовой тепловой модели. Звенья W_i описываются передаточной функцией аперiodического звена первого порядка $W_i = K_i / (T_i p + 1)$, в которой $p = d/dt$ – оператор дифференцирования. Значения элементов рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} K_{11} &= 1 / A_{10}; T_{11} = C_{\Sigma} K_{11}; \\ K_1 &= (A_{10} + A_{21} + A_{41})^{-1}; T_1 = c_C m_1 K_1; \\ K_2 &= (A_{21} + A_{32})^{-1}; T_2 = c_M m_2 K_2; \\ K_3 &= (A_{23} + A_{34})^{-1}; T_3 = c_A m_3 K_3; \\ K_4 &= (A_{34} + A_{41})^{-1}; T_4 = c_C m_4 K_4. \end{aligned} \right\} (4)$$

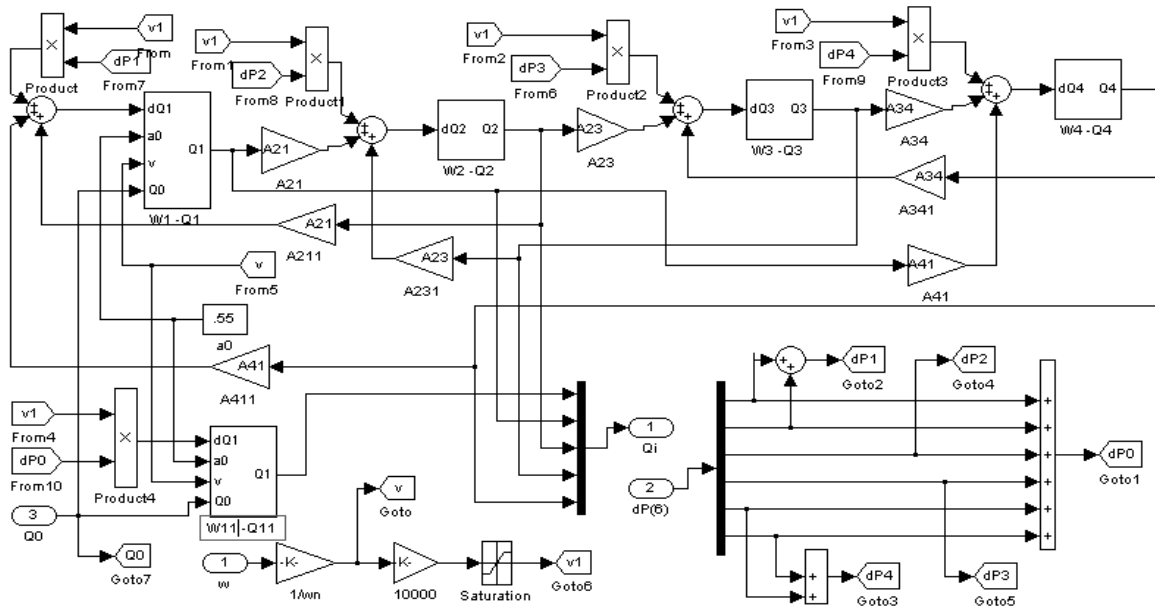


Рис.3. Расчетная структурная схема тепловой модели *Teplo4ad*

Под индексом $i=11$ подразумевается одномассовая тепловая модель АД. В звеньях $W1-Q1$ и $W0-Q11$ для двигателя с самовентиляцией может быть задано изменение коэффициента теплопередачи A_{10} в функции угловой скорости вращения по уравнению

$$A_{10}(\omega) = A_{10N}(a_0 + (1 - a_0)abs(\omega / \omega_N)),$$

где a_0 – коэффициент ухудшения охлаждения [3] ($a_0=1$ для двигателей с принудительной вентиляцией, $a_0=0,3-0,55$ для двигателей с самовентиляцией).

В свернутой структурной схеме тепловой модели *Teplo4ad*, которая представлена на рис. 4, в качестве входных переменных используются составляющие потерь АД, а в качестве выходных переменных – 5-мерный массив температур перегрева.

В таблице сведены результаты расчетов параметров тепловой модели для двигателя 4A160S4Y3. Расчеты выполнялись в соответствии со структурной схемой рис. 3 и по формулам (2) и (3). Масса алюминиевой короткозамкнутой обмотки ротора принимается 50% от массы медной обмотки статора. Установившаяся температура роторной обмотки на 10°C превышает установившуюся температуру статорной обмотки.

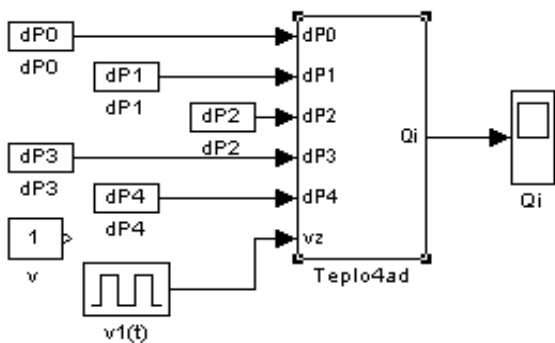


Рис.4. Свернутая структурная схема тепловой модели *Teplo4ad*

На рис. 5 приведены переходные процессы температур элементов тепловой модели двигателя 4A160S4Y3 при постоянных сопротивлениях статора и ротора для длительного номинального режима работы $S1$ (а), повторно-кратковременного режима $S3$ при ПВ=25% и времени цикла 10 мин (б) при температуре окружающей среды 40°C.

Результаты расчета коэффициентов тепловой модели

Параметр	Значения				
i	0	1	2	3	4
c_i , Дж/кг/°C		481	385	896	481
m_i , кг	135	72.072	9.92	4.96	48.048
C_i , Дж/°C	66041	34666	3819	4444	23111
Θ_i	60	60	150	160	90
ΔP_i , Вт	1790.70	610.24	800.75	362.58	7.13
T_i , мин	12.29	5.32	3.16	5.35	30.36
K_i , c°/Дж	0.01117	0.00922	0.04967	0.07222	0,07881
ij	10	21	32	34	41
A_{ij} , Дж/с/°C	89.54	10.02	10.11	3.74	8.95

Анализ переходных процессов температур перегрева показал:

- в длительном режиме работы $S1$:
 - установившиеся значения температур равны расчетным, максимальное значение 160°C соответствует обмотке ротора;
 - время переходного процесса одномассовой модели не превышает 50 мин, что составляет $4T_0$;
 - время переходного процесса первой массы доходит до 100 мин, что значительно превышает время одномассовой модели;
 - темп нагрева статорной обмотки выше, чем у роторной из-за разных постоянных времени нагрева ($T_2 < T_3$);
- в повторно-кратковременном режиме $S3$:
 - квазиустановившийся тепловой режим в одномас-

совой модели наступает после 50 мин, а в многомассовой после 100 мин;

– в одномассовой модели температура колеблется от 47.5 до 50°C;

– у первой массы (корпус двигателя) температура колеблется от 52.5 до 55°C и немного больше, чем у одномассовой модели;

– у обмотки ротора (третья масса) температура колеблется от 70 до 80°C;

– у обмотки статора (вторая масса) температура колеблется от 65 до 87°C,

нижняя температура меньше температуры обмотки ротора из-за более интенсивного охлаждения статора, а верхняя температура выше из-за большей внутренней теплогенерации;

– у магнитопровода ротора (четвертая масса) температура перегрева изменяется, как у апериодического звена второго порядка, колебания не превышают 1°C из-за низкой внутренней теплогенерации и охлаждения через другие тепловые массы.

На основании полученных результатов можно сделать **заключение**, что разработанная тепловая модель качественно и количественно верно отражает внутренние тепловые процессы, происходящие в двигателе, методика расчета параметров модели достаточно проста, и с её помощью можно выполнять исследования более сложных тепловых режимов работы АД.

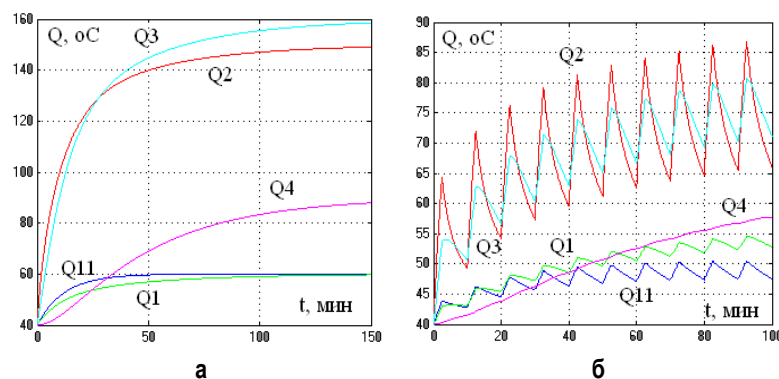


Рис.5. Переходные процессы в тепловой модели для длительного режима работы S1 (а) и повторно-кратковременного режима S3 (б)

Список литературы

1. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
2. Шрейнер Р.Т. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления: учеб. пособие / Р.Т.Шрейнер, А.В.Костылев, В.К.Кривовяз, С.И.Шилин. Екатеринбург: Рос. гос. проф.-пед. ун-т, 2008. 361 с.
3. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. М.: Энергия, 1979. 616 с.

Bibliography

1. Kluchev V.I. Theory of electric drive: A textbook for universities. M.: Energoatomizdat, 1985. 560 p.
2. Shreiner R.T. Electromechanical and thermal conditions of induction engines in frequency control systems: a tutorial / R.T.Shreiner, A.V.Kosteilev, V.K.Krivovяз, S.I.Shilin. Yekaterinburg: GOU VPO «Russian state professional-and-pedagogical university», 2008. 361 p.
3. Theory of automatic electric drive: A tutorial for universities / Chilikin M.G., Kluchev V.I., Sandler A.S. : Energy, 1979. 616 p.