Тепловая модель асинхронного двигателя для целей релейной защиты

БУЛЫЧЁВ А.В., ЕРОХИН Е.Ю., ПОЗДЕЕВ Н.Д., ФИЛИЧЕВ О.А.

Рассмотрены проблемы защиты асинхронного двигателя от перегрева статорной обмотки и недостатки тепловой модели с одной постоянной времени. С использованием метода тепловых схем построена тепловая модель асинхронного двигателя, содержащая пять активных элементов. Показана целесообразность её применения при построении алгоритмов защиты асинхронного двигателя от тепловой перегрузки.

Ключевые слова: *асинхронный двигатель, тепловая модель, релейная защита.*

Problems of protection of an induction motor against overheat of its stator winding and disadvantages of the thermal model with a single time constant are considered. The thermal model containing five active elements is formed using the method of thermal circuits and it is shown that application of the model is reasonable in algorithms of the thermal overload protection of an induction motor.

Key words: *induction motor, thermal model, relay protection.*

Стремление максимально полно использовать перегрузочные возможности электродвигателей и вместе с этим избежать внезапных возмущений электроэнергетических систем при их повреждениях вызывает необходимость совершенствования защит, устанавливаемых на электродвигателях, в части реализации упреждающих функций. Совершенство защиты, в свою очередь, во многом определяется степенью совершенства математической модели контролируемого защитой объекта, положенной в основу принципа действия защиты. В связи с этим, разработка более полной и точной модели нагрева асинхронного электродвигателя (АД) для реализации в цифровых системах релейной защиты является важной и актуальной научно-технической задачей.

Наиболее уязвимым элементом АД является изоляция обмоток статора. С её разрушением связано подавляющее большинство аварий двигателей. При высоких температурах изоляция особенно быстро стареет, теряет электрическую и механическую прочность. При этом возникают благоприятные условия для электрического пробоя и возникновения КЗ. Поэтому в защите АД важно контролировать параметры, характеризующие состояние изоляции, а не состояние машины в целом.

Основным источником тепла в АД являются потери в обмотке статора. Нагрев происходит, в основном, за счёт энергии, выделяющейся в проводниках с током. Кроме этого тепло выделяется в стали (магнитные потери) и во вращающихся элементах машины (механические потери) [1].

Распределение температуры в каком-либо теле с математической точки зрения – функция места и времени. Связь пространственных и временных изменений температуры твёрдого тела, когда в нём действует внутренний источник тепла, устанавливает общее уравнение теплопроводности, выведенное Фурье [2]:

$$c\rho\frac{\partial\vartheta}{\partial t}=\lambda_x\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2}+\lambda_y\frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2}+\lambda_z\frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2}+q_v, \quad (1)$$

где c – удельная теплоёмкость тела; ρ – плотность материала тела; ϑ – температура тела; λ_x, λ_y, λ_z – коэффициенты теплопередачи в направлении координатных осей; q_v – удельное количество тепла, выделяемое или поглощаемое в единицу времени в единице объёма.

Для изотропного тела, когда $\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z$:

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial t}=\frac{q_v}{c\rho}+a\nabla^2\vartheta.$$

Здесь $a=\dfrac{\lambda}{c\rho}$ – температуропроводность; ∇ – оператор векторного дифференцирования.

При отсутствии теплопроводности ($\lambda=0$) имеет место адиабатный процесс. Приняв эту идеализацию, можно получить известный критерий для контроля перегрузок:

$$A=I_*^2t=\text{const},$$

который используется во многих защитах генераторов и электродвигателей (здесь I_* – относительное значение тока перегрузки).

Для высокотеплопроводного тела ($\lambda \to \infty$) уравнение преобразуется в известное уравнение нагрева для однородного тела с бесконечно большой теплопроводностью в охлаждающей среде, имеющей бесконечно большую теплоёмкость:

$$\Delta P = \alpha_{\text{т}} F \vartheta_{\text{с}} + cG \frac{\partial \vartheta_{\text{с}}}{\partial t},$$

где ΔP – мощность, расходуемая на нагрев; $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности тела; G – масса тела; $\vartheta_{\text{с}}$ – превышение температуры тела над температурой окружающей среды.

Последнее уравнение даёт возможность в ряде случаев строить защиты от перегрузки, обеспечивающие более полное использование перегрузочных способностей защищаемой машины.

Аналитическое решение последнего уравнения для процесса нагрева можно представить в следующем виде:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\text{у}}(1 - \text{e}^{-t/\tau}) + \Delta\vartheta_0 \text{e}^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где τ – постоянная времени нагрева; $\Delta\vartheta_{\text{у}}$ – превышение температуры, соответствующее установившемуся тепловому режиму; $\Delta\vartheta_0$ – превышение температуры тела над температурой окружающей среды в начальный момент нагрева.

Для процесса охлаждения ($\Delta P = 0$) решение имеет вид:

$$\vartheta_{\text{с}} = \vartheta_{\text{н}} \text{e}^{-\frac{t}{\tau_0}},$$

где $\vartheta_{\text{н}}$ – превышение температуры в начале процесса охлаждения; τ_0 – постоянная времени, соответствующая режиму охлаждения.

Идеализации, принятые при этом, не оказывает существенного влияния на точность моделирования кратковременных процессов нагрева и охлаждения машин. Однако при длительных процессах (особенно в случаях повторно-кратковременных режимов работы двигателей) погрешности моделирования накапливаются и точность воспроизведения процессов снижается по мере увеличения их длительности [3].

Более точную модель нагрева АД для целей релейной защиты можно построить на основе тепловых схем замещения [4]. Метод основан на аналогии тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений.

АД представляется как совокупность отдельных элементов (тел), каждый из которых имеет свой источник тепла (активный элемент): обмотки, магнитопровод и механические узлы. Отдельные элементы, которые можно рассматривать как однородные тела, связаны между собой тепловыми эквивалентными сопротивлениями. Таким образом, обеспечивается возможность с достаточно высокой точностью определять температуру каждого элемента и учитывать взаимное влияние всех элементов машины на тепловое состояние.

В тепловой схеме замещения электрическую машину представляют системой тел, соответствующих отдельным частям машины, соединённых между собой и с местами отвода тепла тепловыми сопротивлениями. Точность теплового расчёта определяется не только количеством узловых точек, но в большей степени зависит от точности оценки параметров (коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности выбранных материалов и других факторов).

На рис. 1 изображена в общем виде эквивалентная тепловая схема АД с привязкой параметров к основным элементам машины. На схеме приняты следующие обозначения:

$P_1 - P_5$ – источники тепла в электрической машине (P_1 – потери в стали ($P_{\text{ст}}$); P_2 – потери в пазовой части обмотки статора ($P_{\text{паз}}$); P_3 – потери в лобовых частях обмотки статора ($P_{\text{лоб}}$); P_4 – потери в роторе ($P_{\text{рот}}$); P_5 – механические потери ($P_{\text{мех}}$)); $R_1 - R_{23}$ – тепловые сопротивления материалов элементов АД.

Тепловые потоки между отдельными телами с внутренними источниками тепла создают перепады температуры на тепловых сопротивлениях.

Более формализованная эквивалентная тепловая схема замещения АД с короткозамкнутым ротором показана на рис. 2.

Здесь использованы следующие обозначения: T_0 – температура окружающей среды; T_1 – температура корпуса двигателя; T_2 – температура ротора; T_3 – температура пазовой части обмотки статора; T_4 – температура стали статора; T_5 – температура лобовой части обмотки статора; $R_{\text{охл}}$ – тепловое сопротивление системы охлаждения машины; $R_{\text{ст}} = R_{\lambda 3} + R_{\alpha 3}$ тепловое сопротивление стали статора ($R_{\lambda 3}$ – составляющая теплового сопротивления в сторону расточки статора, $R_{\alpha 3}$ – конвективная составляющая сопротивления в сторону расточки); $R_{\text{паз}}$ – тепловое сопротивление пазовой части обмотки статора; $R_{\text{меди}}$ – тепловое со-

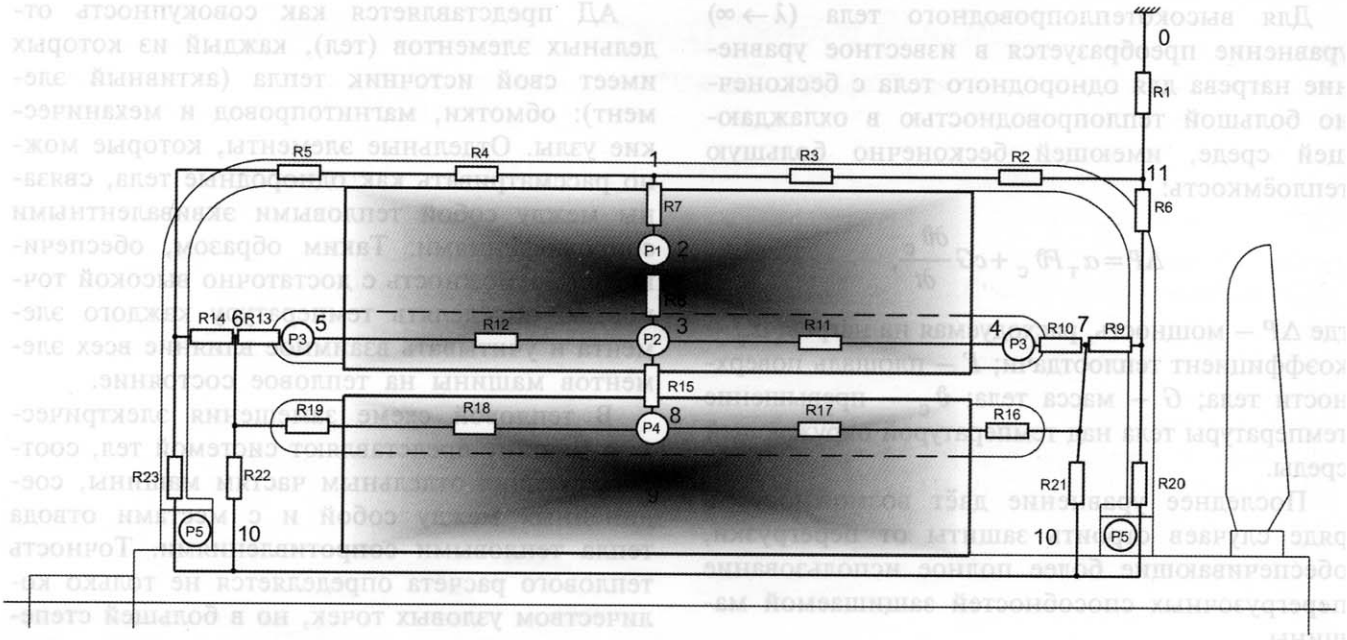

Рис. 1

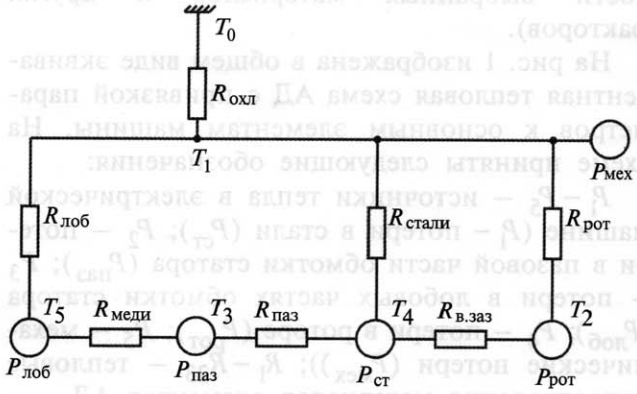

Рис. 2

противление меди обмотки статора; $R_{лоб} = R_к + R_{возд}$ – тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора ($R_к$ – тепловое сопротивление конвекции в зоне лобовых частей обмотки, $R_{возд}$ – тепловое сопротивление воздуха вокруг машины); $R_{в.заз}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора; $R_{рот}$ – тепловое сопротивление стали ротора.

Определение указанных тепловых параметров – предмет отдельного исследования. Например, возможен экспериментальный подход к решению этой задачи [5].

Для каждого элемента составляется уравнение теплового баланса. Все уравнения объединяются в систему.

Система уравнений теплового баланса, учитывающая тепловые свойства каждого элемента АД, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} C_1\left(\frac{d}{dt}T_1\right) + T_1\left(\frac{1}{R_{корп}} + \frac{1}{R_{лоб}} + \frac{1}{R_{ст}}\right) - T_0\frac{1}{R_{корп}} - \\ -T_4\frac{1}{R_{лоб}} - T_2\frac{1}{R_{ст}} = 0; \\ C_2\left(\frac{d}{dt}T_2\right) + T_2\left(\frac{1}{R_{паз}} + \frac{1}{R_{ст}}\right) - T_3\frac{1}{R_{паз}} - \\ -T_1\frac{1}{R_{ст}} = P_{ст}; \\ C_3\left(\frac{d}{dt}T_3\right) + T_3\left(\frac{1}{R_{меди}} + \frac{1}{R_{паз}}\right) - T_4\frac{1}{R_{меди}} - \\ -T_2\frac{1}{R_{паз}} = \frac{P_{эл}}{3}; \\ C_4\left(\frac{d}{dt}T_4\right) + T_4\left(\frac{1}{R_{лоб}} + \frac{1}{R_{меди}}\right) - T_1\frac{1}{R_{лоб}} - \\ -T_3\frac{1}{R_{меди}} = \frac{2P_{эл}}{3}; \\ C_5\left(\frac{d}{dt}T_5\right) + T_5\left(\frac{1}{R_{рот}}\right) - T_1\frac{1}{R_{рот}} = P_{рот}, \end{cases} \quad (3)$$

где C_1 – теплоёмкость корпуса двигателя; C_2 – теплоёмкость стали статора; C_3 – теплоёмкость пазовой части обмотки статора; C_4 – теплоёмкость лобовых частей обмотки статора; C_5 – теплоёмкость ротора; $P_{эл}$ – суммарные потери в обмотке статора.

Каждое из этих дифференциальных уравнений описывает характер изменения температуры элемента АД во времени. Решив систему дифференциальных уравнений, получим значения температуры элементов машины.

Таким образом, система уравнений (3) представляет собой тепловую модель АД с короткозамкнутым ротором.

При реализации алгоритмов защиты систему уравнений можно упростить за счёт использования доступных для измерения величин. Например, задавая реальные значения температуры корпуса АД, первое уравнение системы (3) можно исключить. Для этого на корпусе двигателя необходимо установить датчик температуры и использовать реальные данные в процессе вычислений.

В качестве примера на рис. 3 показаны кривые изменения температуры отдельных элементов двигателя (АИР100S4 с номинальной мощностью 3 кВт) в номинальном режиме из исходного отключённого состояния.

Как видно, наибольшую температуру имеют лобовые части обмотки статора, несколько меньше температура пазовой части обмотки статора, что объясняется лучшими условиями отвода тепла.

Для определения степени детализации тепловой модели на основе предложенного метода было проведено моделирование тепловых процессов для моделей с различным количеством элементов. При увеличении количества элементов (количества уравнений системы) увеличивается точность вычислений, но вместе с этим растёт время решения системы. Установлено, что оптимальное соотношение точности и времени вычисления обеспечивается при использовании модели, содержащей 5 элементов. Это число определяется количеством

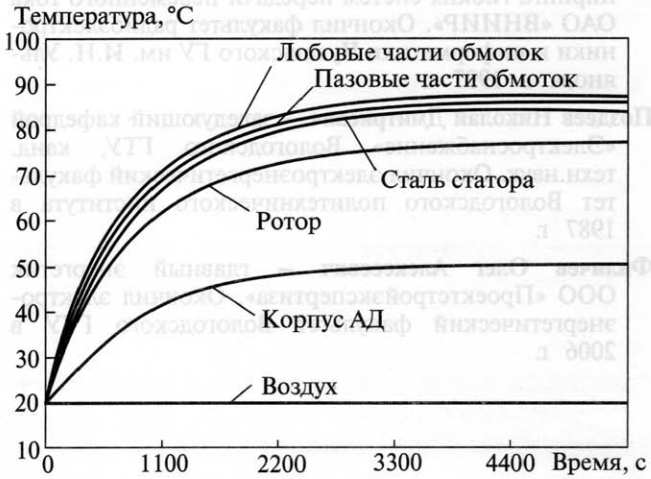

Рис. 3

активных элементов АД, параметры теплообмена которых постоянны по всему их объёму, что позволяет считать их (с приемлемыми для релейной защиты допущениями) однородными телами.

Изменение температуры элементов АД при охлаждении в отключённом состоянии из исходного номинального режима показано на рис. 4.

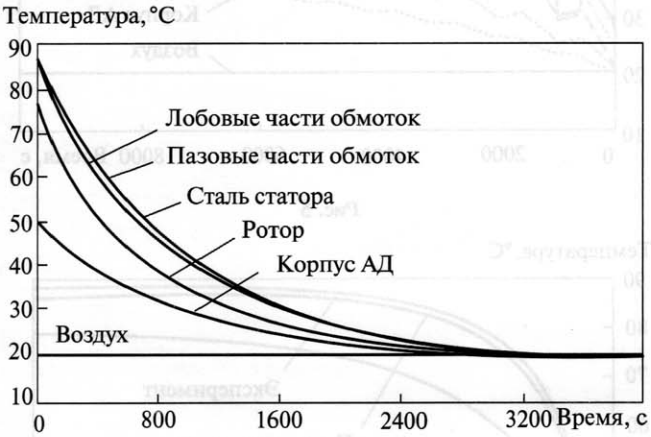

Рис. 4

Наиболее характерным режимом работы многих АД является повторно-кратковременный, который состоит из последовательных циклов нагрева и охлаждения. Конечная температура интервала нагрева является начальной для интервала охлаждения. На рис. 5 показаны процессы изменения температуры элементов машины при повторно-кратковременном режиме работы.

Для проверки адекватности разработанной тепловой модели проведены лабораторные испытания АД АИР100S4 с целью получения тепловых характеристик обмотки статора. Для этого в АД на лобовую и пазовую части обмотки статора были установлены датчики температуры марки ММТ-1 (терморезистор). Измерения проводились при нормальных параметрах окружающей среды (температура +200С; атмосферное давление 750 мм; влажность 85%).

Полученная в ходе эксперимента кривая нагрева обмотки статора АД АИР100S4 и кривые нагрева обмоток для однотельной и пятительной тепловой модели представлены на рис. 6.

Анализ данных показал, что разность температур, полученных расчётным путём на основе модели, учитывающей пять активных элементов, и измеренных с помощью датчиков, в установившемся режиме не более 1,5 °С, что составляет 1,7% действительного

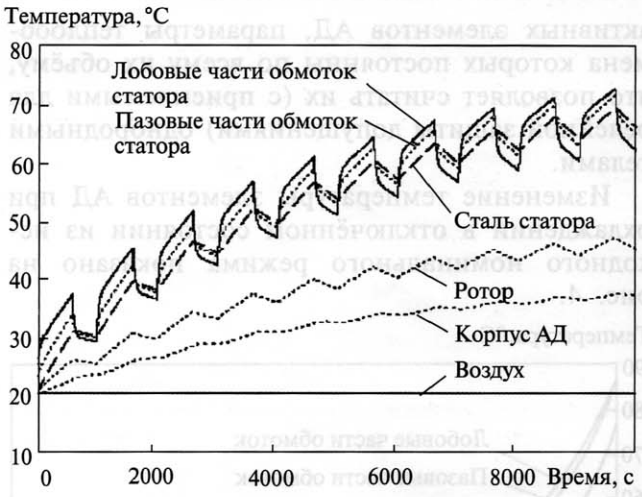

Рис. 5

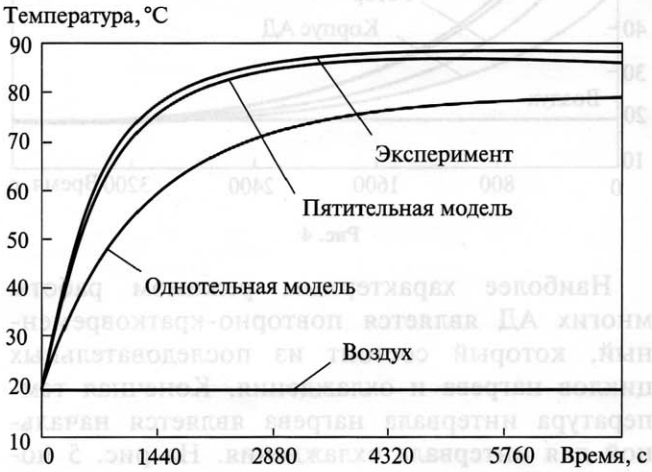

Рис. 6

значения. Для однотельной тепловой модели отклонение значения температуры от действительной составляет 9,5 °С (более 10%).

Кривая нагрева обмотки статора АД и расчётные кривые для повторно-кратковременного режима работы представлены на рис. 7.

В этом режиме характеристика пятительной тепловой модели расположена достаточно близко к экспериментальной кривой нагрева обмотки. При этом следует отметить, что с увеличением времени работы АД, погрешность расчёта температуры обмотки статора не увеличивается, т.е. нет эффекта накопления ошибки.

Выводы

Проведены исследования, позволившие установить, что при построении защиты от перегрузки АД целесообразно использовать тепловую модель, содержащую пять элементов (по числу активных элементов АД, параметры теплообмена которых с приемлемой для релейной защиты точностью можно считать постоянными по всему объёму).

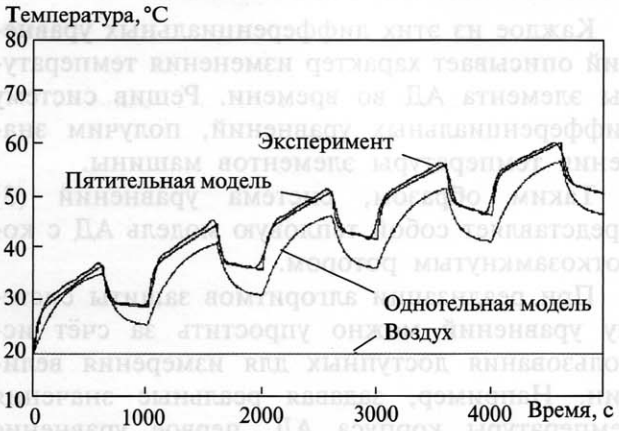

Рис. 7

Список литературы

1. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2008.

2. **Готтер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.

3. **Булычев А.В., Езерский В.Г., Захаров О.Г., Поздеев Н.Д.** Исследование цифровых устройств серии БМРЗ-Д для защиты электродвигателей на физической модели // Энергетик. 2006. №3. С. 19–22.

4. **Филиппов И.Ф.** Основы теплообмена в электрических машинах. Л.: Энергия, 1974.

5. **Бугаев Г.А., Ерохин Е.Ю.** Определение параметров тепловой модели асинхронного электродвигателя // Труды АЭН Чувашской Республики. 2002. №2. С. 21–26.

Булычёв Александр Витальевич – заместитель генерального директора по науке ОАО «ВНИИР», доктор техн. наук, профессор. Окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1980 г.

Ерохин Евгений Юрьевич – заведующий отделом инжиниринга гибких систем передачи переменного тока ОАО «ВНИИР». Окончил факультет радиоэлектроники и информатики Чувашского ГУ им. И.Н. Ульянова в 1997 г.

Поздеев Николай Дмитриевич – заведующий кафедрой «Электроснабжение» Вологодского ГТУ, канд. техн.наук. Окончил электроэнергетический факультет Вологодского политехнического института в 1987 г.

Филичев Олег Алексеевич – главный энергетик ООО «Проектстройэкспертиза». Окончил электроэнергетический факультет Вологодского ГТУ в 2006 г.