

лонны был равен 0,375 м. Эксперименты выполнялись при относительных погружениях реактора 0,6 и 0,7.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет с достаточной точностью определить расходные характеристики металлургических газлифтных реакторов и оценить скорости циркуляционного течения металла в подъемной колонне, которые оказывают значительное влияние на эффективность процессов тепло- и массообмена при обработке расплава реагентами.

Список литературы

1. Ефименко С.П., Мачикин В.И., Лифенко Н.Т. Вспечное рафинирование металла в газлифтах. — М.: Металлургия, 1986. — 264 с.
2. Идельчик И.Е. Гидравлическое сопротивление. — М.: Энергоиздат, 1964. — 365 с.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 367 с.
4. Соколов В.Н., Геллис Ю.К. // Химическая промышленность, 1962. — № 10. — С. 757–761.
5. Применение погружного газлифтного реактора для корректировки химического состава и модифицирования передельного чугуна. / Лифенко Н.Т., Пилюшенко В.Л., Черкашин И.В. и др. // Черметинформация, 1990. — № 3. — С. 50–52.

© Лифенко Н.Т., 1999.

КОНТРОЛЬ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ РЕВЕРСИВНЫХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

ФЕДОРОВ М.М. (ДонГТУ)

На основе использования динамических тепловых моделей узлов исследованы особенности динамики теплового состояния электродвигателей прокатных станков и предложены принципы построения микропроцессорной системы контроля и прогнозирования их теплового состояния.

Электропривода реверсивных прокатных станков характеризуются высокой установочной мощностью и напряженными режимами работы. Суммарная мощность электрических машин основных приводов тяжелого стана достигает 50 МВт, при этом мощность приводных двигателей одной клетки 14 МВт [1]. Значительная мощность и электродвигателей вспомогательных механизмов (нажимные винты, манипуляторы и др.). Они работают в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками и электрическим торможением (S5 согласно ГОСТ 183-74).

В связи с большим числом включений в час, достигающим 1000 и более и продолжительностью включений ($PB=0,5-0,6$), а также вследствие высоких требований к режимам управления, предъявляемых технологическими процессами, для привода механизмов современных станков, используются двигатели постоянного тока, получающие питание преимущественно от управляемых тиристорных преобразователей.

Напряженные режимы работы могут привести к тепловым перегрузкам в обмотках электродвигателей, поэтому вопросы контроля температуры актуальны. Температура обмоток двигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах, определяется токовыми нагрузками в цикле. На рисунке 1 приведена нагрузочная диаграмма двигателя, работающего в режиме S5. Величины токов на интервалах определяются на-

стройкой системы электропривода. В установившемся режиме (t_p) при постоянной частоте вращения ($n_{уст}$) ток I_c , как правило, принимают равным половине номинального ($I_c=0,5I_n$). В режиме пуска и торможения величины токов зависят от динамического тока I_d и соответственно равны $I_{пс}=I_d+I_c$, $I_{т}=I_d-I_c$. Современные системы управления настраиваются из условия обеспечения постоянства ускорения (замедления при пуске с торможением), а следовательно, постоянства динамического тока I_d и равенства времени пуска $t_{пс}$ и торможения $t_{т}$ ($t_{пс}=t_{т}$). С учетом паузы $t_{пз}$ длительность цикла $t_{ц}$ в режиме S5 равна $t_{ц}=t_{пс}+t_p+t_{т}+t_{пз}$, а продолжительность включения ПВ= $(t_{пс}+t_p+t_{т})/t_{ц}$.

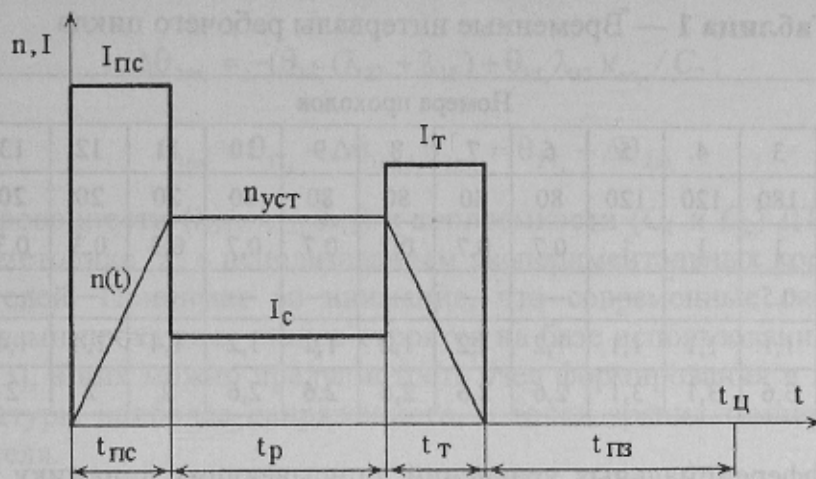


Рисунок 1 — Нагрузочная диаграмма двигателя в режиме S5

Временные интервалы нагрузочной диаграммы определяются также и режимами работы стана. Рабочий цикл реверсивного стана может предусматривать 11–17 проходов, при этом нагрузочные диаграммы в каждом проходе существенно изменяются. В качестве примера рассмотрим нагрузочную диаграмму двигателя нажимного устройства обжимного стана ДМЗ, рабочий цикл которого включает 15 проходов. В течение каждого прохода нажимное устройство должно обеспечивать определенные перемещения валков. Их величины для указанного рабочего цикла приведены в таблице 1, в которой приведены также временные интервалы. Расчет временных интервалов осуществлен из условия $I_d=2I_n$ ($I_{пс}=2,5I_n$, $I_{т}=1,5I_n$). В этом случае время пуска $t_{пс}$ до номинальной скорости составляло 1с, а перемещение валков $l_k=60$ мм. Последнее означает, что при перемещениях менее 120 мм отсутствует участок работы с установившейся скоростью ($t_p=0$). Время пауз определяется режимом работы других механизмов станка. Их величины были определены с помощью обработки осциллограмм реального процесса. Принимая во внимание вышеизложенное были рассчитаны временные интервалы нагрузочной диаграммы цикла двигателя нажимного устройства. Результаты приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что суммарное время цикла равно $t_{ц}=45,5$ с, что соответствует 1200 включениям в час. Суммарное время пуска и торможения $t_{пс}=t_{т}=10$ с., $t_p=7,3$ с., а время пауз $t_{пз}=18,2$ с. (ПВ=0,6).

Температура обмоток двигателя может существенно меняться в зависимости от настройки системы управления электроприводом из-за изменения мощности потерь. Например, при увеличении ускорения в 1,25 раз ($I_d=2,5I_n$) временные интервалы уменьшаются незначительно (суммарные $t_{ц}=43,1$ с, а $t_{пс}=t_{т}=8,5$ с.), а мощность потерь при пуске и торможении возрастает соответственно в 1,22 и 1,51 раз. Последнее озна-

чает актуальность непрерывного контроля температуры обмоток. Использование встроенных в обмотки датчиков температуры практически исключено по различным причинам, таким как сложность передачи маломощного сигнала датчика в систему управления от вращающихся частей и пр., поэтому контроль температуры необходимо осуществлять с помощью устройств с косвенной оценкой. Основным требованием к таким устройствам является наличие в них узла моделирования, позволяющее адекватно воспроизводить тепловые переходные процессы в обмотках в сложных повторно-кратковременных режимах. Наиболее перспективной является динамическая тепловая модель (ДТМУ) электрической машины, разработанная в ДонГТУ [2].

Таблица 1 — Временные интервалы рабочего цикла

	Номера проходов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$l, \text{мм}$	1000	180	180	120	120	80	80	80	80	80	20	20	20	20	20
$t_{nc}=t_r, \text{с}$	1	1	1	1	1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$t_p, \text{с}$	6,3	0,5	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$t_{пз}, \text{с}$	0,8	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
$t_{ш}, \text{с}$	9,1	3,6	3,6	3,1	3,1	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2	2	2	2	2

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику теплового состояния в выбранном узле электродвигателя, имеет вид:

$$\begin{aligned} C_1(d\theta_1/dt) + \theta_1(\lambda_{11} + \lambda_{12}) - \theta_2\lambda_{12} &= P_1; \\ C_2(d\theta_2/dt) + \theta_2(\lambda_{22} + \lambda_{12}) - \theta_1\lambda_{12} &= P_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где: θ_1 — температура выбранного узла электродвигателя; θ_2 — эквивалентная температура, учитывающая реакцию остальных частей двигателя на тепловые процессы в выбранном узле; $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}$ — теплопроводности ДТМУ, соответствующие режиму охлаждения двигателя; C_1 и C_2 — теплоемкости ДТМУ; P_1 и P_2 — соответственно потери мощности в выбранном узле двигателя и суммарные потери в остальных частях.

На основе приведенных уравнений составляется алгоритм формирования температуры в выбранном узле. Для i -го цикла, используя известные величины температур в начале цикла θ_{1i-1} и θ_{2i-1} поочередно рассчитывают приращения $\Delta\theta_{1i}$ и $\Delta\theta_{2i}$, а также температуры θ_{1i} и θ_{2i} в конце каждого интервала цикла. В режиме S5 цикл состоит из пяти временных интервалов: пуск $t_{псi}$, работа $t_{рi}$, торможение $t_{тi}$, и пауза $t_{пзi}$. Порядок расчета i -го цикла следующий:

$$\Delta\theta_{1псi} = (P_{1псi} - \theta_{1пзi-1}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{2пзi-1}\lambda_{12})t_{псi} / C_1;$$

$$\theta_{1псi} = \theta_{1пзi-1} + \Delta\theta_{1псi}, \theta_{2псi} = \theta_{2пзi-1} + \Delta\theta_{2псi};$$

$$\Delta\theta_{1рi} = (P_{1рi} - \theta_{1псi}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{2псi}\lambda_{12})t_{рi} / C_1;$$

$$\Delta\theta_{2рi} = (P_{2рi} - \theta_{2псi}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{1псi}\lambda_{12})t_{рi} / C_2;$$

$$\begin{aligned}
 \theta_{1p_i} &= \theta_{1nc_i} + \Delta\theta_{1p_i}, \theta_{2p_i} = \theta_{2nc_i} + \Delta\theta_{2p_i}; \\
 \Delta\theta_{1T_i} &= (P_{1T_i} - \theta_{1p_i}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{2p_i}\lambda_{12})t_{T_i} / C_1; \\
 \Delta\theta_{2T_i} &= (P_{2T_i} - \theta_{2p_i}(\lambda_{11} + \lambda_{12}) + \theta_{1p_i}\lambda_{12})t_{T_i} / C_2; \\
 \theta_{1T_i} &= \theta_{1p_i} + \Delta\theta_{1T_i}, \theta_{2T_i} = \theta_{2p_i} + \Delta\theta_{2T_i}; \\
 \Delta\theta_{1пз_i} &= -(\theta_{1T_i}(\lambda_{11} - \lambda_{12}) + \theta_{2T_i}\lambda_{12})t_{пз_i} / C_1; \\
 \Delta\theta_{2пз_i} &= -(\theta_{1T_i}(\lambda_{22} + \lambda_{12}) + \theta_{1T_i}\lambda_{12})t_{пз_i} / C_2; \\
 \theta_{1пз_i} &= \theta_{1T_i} + \Delta\theta_{1пз_i}, \theta_{2пз_i} = \theta_{2T_i} + \Delta\theta_{2пз_i}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Теплопроводности ($\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}$) и теплоемкости (C_1 и C_2) ДТМУ определяются по известной методике [2] с использованием экспериментальных кривых нагрева узлов электродвигателей. Принимая во внимание, что современные системы управления электроприводами прокатных станов строятся на базе использования микропроцессорной техники [3], в них можно предусмотреть узел формирования и непрерывного контроля температуры наиболее напряженного, с точки зрения температур, узла (узлов) электродвигателя.

С этой целью в память микропроцессорной системы вводятся теплопроводности и теплоемкости ДТМУ соответствующего узла (узлов), а также постоянные $P_{пост}$, переменные $P_{пер\ n}$ и добавочные $P_{доб\ n}$ потери при номинальном режиме работы. Принимая во внимание, что в систему управления электроприводом осуществляется непрерывный контроль тока якоря и можно рассчитать коэффициент кратности тока $\beta_{I_i} = I_i / I_n$ на любом интервале i -го цикла можно сформировать величину переменных потерь по формуле:

$$P_{пер\ i} = (\beta_{I_i})^2 \cdot P_{пер\ n} (1 + \alpha(\theta_i - \theta_{нач})), \tag{3}$$

где α — температурный коэффициент сопротивления.

Добавочные потери также принято считать пропорциональными квадрату тока якоря

$$P_{доб\ i} = (\beta_{I_i})^2 \cdot P_{доб\ n}. \tag{4}$$

Из вышеизложенного следует, что с помощью микропроцессорных систем управления электроприводами можно осуществлять контроль температуры различных узлов электродвигателей. При этом существующие резервы микропроцессорной системы позволяют реализовывать приведенный выше алгоритм расчета температуры и не требуют дополнительных затрат. Необходимо отметить, что контроль температуры обмоток в системах управления электродвигателями прокатных станов, используемых в отечественной практике, практически отсутствует. Непрерывный контроль теплового состояния, кроме защиты обмоток от тепловых перегрузок, позволяет системе управления осуществлять и другие функции, такие, как учет изменения сопротивления обмоток в функции температуры, расход ресурса изоляционных материалов.

ДТМУ могут быть использованы на стадии проектирования или технологической реконструкции при выборе мощности двигателя и его оптимального режима рабо-

ты. В этой связи интерес представляет прогнозирование теплового состояния обмоток в квазиустановившемся режиме при различных токовых диаграммах рабочего цикла. В квазиустановившемся состоянии закон изменения температуры $\theta(t)$ в цикле периодически повторяется в последующих циклах.

Для расчета характеристик квазиустановившегося состояния можно использовать ДТМУ. Решение дифференциальных уравнений теплового состояния (1) для i -го цикла будет иметь вид:

При нагреве (пуск, работа, торможение):

$$\begin{aligned}\theta_{1i} &= \theta_{1уст} (1 - a_{11i} \cdot \exp(-t/T_1) - a_{12i} \cdot \exp(-t/T_2)); \\ \theta_{2i} &= \theta_{2уст} (1 - a_{21i} \cdot \exp(-t/T_1) - a_{22i} \cdot \exp(-t/T_2)).\end{aligned}\quad (5)$$

При охлаждении (пауза)

$$\begin{aligned}\theta_{1i} &= \theta_{1нз}(0) (b_{11i} \cdot \exp(-t/T_1) - b_{11i} \cdot \exp(-t/T_2)); \\ \theta_{2i} &= \theta_{2нз}(0) (b_{21i} \cdot \exp(-t/T_1) - b_{22i} \cdot \exp(-t/T_2)),\end{aligned}\quad (6)$$

где: $\theta_{1уст}$ и $\theta_{2уст}$ — установившиеся температуры, соответствующие работе электродвигателя в продолжительном режиме S1 при токе интервала; $\theta_{1нз}(0)$ и $\theta_{2нз}(0)$ — начальные значения температур при паузе; T_1 и T_2 — большая и малая постоянные времени экспонент; a_{11i} , a_{12i} , a_{21i} , a_{22i} , b_{11i} , b_{12i} , b_{21i} , b_{22i} — соответственно коэффициенты удельного веса экспонент при нагреве и охлаждении.

Постоянные времени экспонент определяют при решении характеристического уравнения (1). В общем случае они могут различаться на каждом интервале. Однако, при принудительном охлаждении, когда пассивные параметры ДТМУ (λ_{11} , λ_{12} , λ_{13} , C_1 и C_2) неизменны в различных режимах, величины T_1 и T_2 при всех режимах нагрева и охлаждения неизменны. Коэффициенты удельного веса экспонент в общем случае находятся в линейной зависимости от значений температур $\theta_{1i}(0)$ и $\theta_{2i}(0)$ в начале интервала. Если в выражения (4) или (5) подставить время $t=t_{ин}$, равное длительности интервала, то получим значение температур $\theta_{1i}(t_{ин})$ и $\theta_{2i}(t_{ин})$ в конце интервала и для каждого получим по два уравнения вида:

$$\begin{aligned}D_{11i}\theta_{1i}(0) + D_{12i}\theta_{2i}(0) + D_{13i}\theta_{1i}(t_{ин}) + D_{14i}\theta_{2i}(t_{ин}) &= F_{1i}; \\ D_{21i}\theta_{1i}(0) + D_{22i}\theta_{2i}(0) + D_{23i}\theta_{1i}(t_{ин}) + D_{24i}\theta_{2i}(t_{ин}) &= F_{2i},\end{aligned}\quad (7)$$

где: D_{11i} — D_{24i} , F_{1i} и F_{2i} — коэффициенты, получаемые из (4) и (5) при подстановке $t=t_{ин}$.

Принимая во внимание, что температуры θ_{1i} и θ_{2i} в конце интервала равны температурам в начале следующего интервала, а также в квазиустановившемся состоянии равенство температур в начале и конце цикла для режима S5, имеющего четыре интервала, получаем систему восьми уравнений с восемью неизвестными температурами $\theta_{1i}(t_{ин})$ и $\theta_{2i}(t_{ин})$ в конце каждого интервала цикла. Микропроцессорная система позволяет реализовать вышеуказанный алгоритм и определить максимальные значения температур в квазиустановившемся состоянии при различных диаграммах нагрузки. Максимальные значения температуры свидетельствуют о тепловых перегрузках изоляции обмоток. Если они превышают допустимые, то необходимо ввести соответствующие кор-

реактивы при выборе мощности двигателя или в режиме его работы. Величина допустимой температуры может быть одним из критериев при построении оптимальной диаграммы работы двигателя в цикле.

Прогнозирование температурного состояния можно осуществлять и в процессе эксплуатации. Для этого в микропроцессорной системе необходимо предусмотреть программу формирования осредненного или наиболее протяженного циклов (например, в течение одного часа работы). Рассчитав длительности интервалов и потери для этих циклов, по предложенным выше методикам определяются температуры в квазиустановившемся состоянии. Если температуры обмоток (или ее частей) превышают допустимые, то необходимо ввести соответствующие коррективы в режим работы. При этом можно рассчитывать и рекомендуемый режим, в котором отсутствовали бы тепловые перегрузки. Необходимо отметить, что пассивные параметры ДТМУ (теплопроводности и теплоемкости) определяются массогабаритными показателями и едины для всех двигателей одного типоразмера. Они могут быть определены на заводе изготовителе и внесены в каталог. Распределение потерь у каждого двигателя индивидуально и может быть определено по опытным данным на месте эксплуатации.

В ДонГТУ разработаны методики и подготовлены программы на ЭВМ для расчета квазиустановившегося состояния электродвигателей, работающих в циклах произвольной сложности. В программах предусмотрены расчеты при наличии в циклах 40 интервалов, с учетом различия пассивных параметров ДТМУ на всех интервалах. Опыт использования предложенных методик для осуществления контроля и прогнозирования теплового состояния обмоток двигателей приводных механизмов в различных отраслях промышленности подтверждает их эффективность.

Из вышеизложенного следует, что режим работы электродвигателей реверсивных прокатных станов напряженный. Относительно небольшие изменения в режиме прокатки оказывают существенное влияние на диаграмму токовых нагрузок, а, следовательно, и температуру обмоток, поэтому контроль их температурного состояния является актуальной задачей. Для двигателей постоянного тока контроль температуры обмотки якоря практически может быть осуществлен с помощью устройств, основанных на косвенной оценке температуры, по величине тока якоря. Динамику теплового состояния обмоток по току якоря наиболее рационально воспроизводить с помощью динамических тепловых моделей узлов электрических машин. Реализация системы контроля и прогнозирования теплового состояния обмоток может быть реализована в виде отдельного устройства или программного комплекса микропроцессорной системы управления электроприводом.

Список литературы

1. Слежановский О.В. Электропривод реверсивных станков горячей прокатки. — М.: Гостехиздат по черной и цветной металлургии, 1961. — 445 с.
2. Сб. трудов ДонГТУ. Электротехника и энергетика. Выпуск 2. Микропроцессорные системы защиты асинхронных двигателей от тепловых перегрузок Федоров М.М и др.
3. Перельмутер В.М., Соловьев А.К. Цифровые системы управления тиристорным электроприводом. — Киев: Техника, 1983г. — 104 с.

© Федоров М.М., 1999.