

Величина предэкспоненциального множителя составила:

$$k_0 = \exp(-3,238) = 0,039 \text{ м/с.}$$

Из уравнения $y = -4341,7 \cdot x - 3,4447$ определен тангенс угла наклона прямой: при $x = 0$, $y = -3,4447$; при $y = 0$, $x = -\frac{3,238}{4341,7} = -7,6 \cdot 10^{-4}$. Тогда тангенс угла

наклона прямой равен $\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{R} = \frac{3,238}{7,6} \cdot 10^4 = 4341,7$.

Энергия активации равна: $E_a = 4341,7 \cdot 8,314 = 36100$ кДж/кмоль.

Таким образом, расчетная формула константы химического реагирования цинкового концентрата в зависимости от температуры кипящего слоя принимает вид:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) = 0,039 \cdot \exp\left(-\frac{36100}{8,314 \cdot T}\right) \text{ м/с.} \quad (4)$$

Сопоставление рассчитанных данных (линия) по формуле (4) с данными эксперимента (точки) представлено на рис. 4.

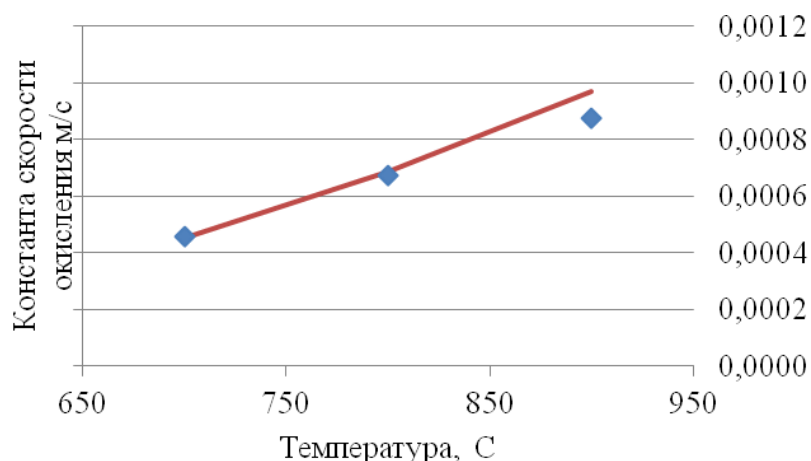


Рис. 4. Сопоставление аппроксимации с экспериментальными данными

В результате проведенных экспериментов были получены данные, которые могут быть использованы в дальнейших расчетах по оптимизации обжига шихты.

Установлено, что полнота обжига цинкового концентрата зависит от следующих параметров: дисперсности состава шихты, скорости дутья, концентрации кислорода в дутье и температуры слоя. Определенное сочетание данных параметров обеспечивает увеличение выхода конечного продукта.

В дальнейших исследованиях планируется получить зависимости константы скорости химического реагирования чистых веществ (сфалерита и пирита) от диаметра частиц и концентрации кислорода в дутье.

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

*Казакбаев В.М., Дмитриевский В.А., Прахт В.А.
УрФУ, emf2010@mail.ru*

В соответствии с планами российского правительства снизить энергоемкость на 40 % к 2020 г., повышение энергоэффективности является одной из самых приоритетных задач для российской экономики. Наибольший потенциал

повышения энергоэффективности содержит в себе возможность увеличения КПД установок электропривода, что являются самым крупным энергопотребителем (более 60 % в промышленности) [1]. По этой причине создание отечественных серийных двигателей, имеющих высокие классы энергоэффективности, согласно требованиям ГОСТ Р 54413-2011 «Машины электрические вращающиеся. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей (код IE)», становится одной из самых актуальных и приоритетных задач в сфере электромашиностроения.

Асинхронный двигатель (АД) был и остается основой большинства промышленных электроприводов (ЭП) (примерно 82 % по состоянию на 2002 г. [1]). В настоящее время конструкция АД доведена до совершенства: оптимизированы обмоточные данные, изоляционные материалы, источники питания [1]. Таким образом, оставаясь приемлемыми по стоимости, АД могут соответствовать лишь классу эффективности IE2. Создание экономически рентабельного электропривода более высокого IE класса возможно при замене АД синхронным реактивным двигателем (СРД), который, в отличие от АД, не имеет обмотки ротора и связанных с ротором электрических и магнитных потерь [3]. За рубежом в настоящее время уже выпускаются серии энергоэффективных СРД классов IE3 и IE4.

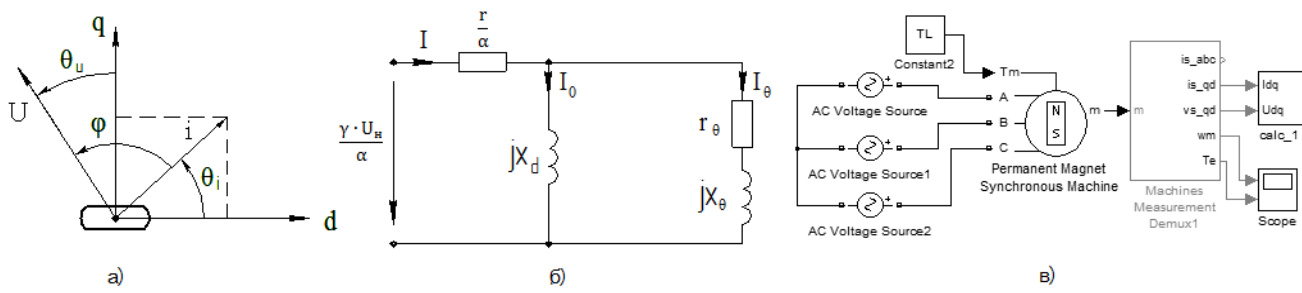
Одной из задач, которые необходимо выполнить для внедрения машин в серийное производство, является разработка инженерной методики их проектирования. На кафедре электротехники и электротехнологических систем УрФУ, в рамках проекта по созданию энергоэффективного СРД [1], ведется разработка методики проектирования СРД мощностью 0,6-50 кВт. В данной статье рассматривается один из аспектов этой методики: применение теории схем замещения к расчету энергетических характеристик СРД.

Для получения уравнений схемы замещения СРД необходимо рассмотреть векторную диаграмму фазы статора синхронной реактивной машины [2, 3]. В дальнейших расчетах распределение обмотки статора принято синусоидальным, а магнитная проводимость сердечника – постоянной. Также были приняты допущения об отсутствии магнитных потерь и индуктивностей рассеяния. Для учета того, что при питании от преобразователя частоты амплитуда и частота напряжения могут изменяться, введем следующие обозначения: U_n – номинальное фазное напряжение, f_n – номинальная частота питания, U – фазное напряжение в расчетном режиме работы, f – частота в расчетном режиме работы, $\omega = 2\pi \cdot f$, $\omega_n = 2\pi \cdot f_n$, $\gamma = U/U_n$, $\alpha = f/f_n$.

Из векторной диаграммы можно определить выражение для комплекса тока фазы статора через напряжение, параметры машины и угол между вектором тока и осью d ротора (угол θ_i , см. рисунок а) [2]:

$$\dot{I} = I_0 + I_\theta = -j \cdot \frac{\dot{U}'}{x_d} + \frac{\dot{U}'}{(r_\theta - j \cdot x_\theta)} \quad (1)$$

где I_0 – ток намагничивания; I_θ – нагрузочный ток; r – активное сопротивление фазы статора; $\dot{U}' = \frac{\gamma}{\alpha} \cdot U_n - \dot{I} \cdot \frac{r}{\alpha}$; $x_\theta = x_q / (1 - x_q / x_d)$; $r_\theta = x_\theta \cdot x_d / x_q \cdot \operatorname{tg} \theta_i$; $x_d = \omega_n \cdot L_d$, $x_q = \omega_n \cdot L_q$ – индуктивные сопротивления статора по осям d и q, соответственно.



а – Векторная диаграмма СРД; б – Схема замещения СРД с параметрами; зависимыми от угла θ_i ; в – SimPowerSystems модель СРД

Выражение (1) соответствует электрической схеме (рисунок б). В этой схеме присутствуют реальные сопротивления машины: r – в первичной ветви, и x_d – в ветви намагничивания. Вторичную ветвь составляют фиктивные сопротивления r_θ и x_θ . Величина r_θ зависит от значения угла θ_i , характеризующего режим работы двигателя. Мощность, выделяющаяся на активном сопротивлении вторичной ветви равна электромагнитной мощности, которая в реальном двигателе, идет на создание момента:

$$P_{ЭМ} = m \cdot r_\theta \cdot I_\theta^2 = M_{ЭМ} \cdot \omega, \quad (2)$$

где $m = 3$ – число фаз двигателя, $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент двигателя.

Покажем далее применение схемы (рисунок б) для расчета СРД с заданными параметрами (параметры двигателя, источника питания и нагрузки даны в табл. 1). Значение угла θ_i , необходимое для расчета сопротивления r_θ определяется исходя из соотношения: $\theta_i = \theta_u + \pi/2 - \varphi$ (см. (рисунок а)). При этом значение θ_u для случая нерегулируемого двигателя определяется из уравнения:

$$M_{ЭМ}(\theta_u) - M_H = 0, \quad (3)$$

где $M_{ЭМ}(\theta_u)$ – механическая характеристика двигателя, с учетом сопротивления r [2], M_H – значение момента нагрузки. Угол φ определяется в соответствии с выражением активной мощности, которое можно получить из векторной диаграммы [2]:

$$m \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \frac{m \cdot U^2}{r^2 + x_d \cdot x_q} \cdot [r + 0,5 \cdot (x_d - x_q) \cdot \sin(2 \cdot \theta_u)] \quad (4)$$

Таблица 1
Параметры моделируемого привода

Параметр	R, Ом	Ld, Гн	Lq, Гн	U, В (амплитуда)	f, Гц	Z _p , (число пар полюсов)	J, кг·м ² (момент инерции)	M _H , Н·м
Значение	2,5	0,08	0,01	200	50	1	0,0001	10

После определения значения угла θ_i схема (рисунок б) может быть рассчитана любым известным методом расчета цепей переменного тока. Для сопоставления с результатами расчета схемы замещения также был проведен рас-

чет по динамической модели с использованием стандартного блока библиотеки SimPowerSystems “Permanent Magnet Synchronous Motor” (рисунок в). При этом поток постоянных магнитов двигателя был принят равным нулю. Результаты расчета обеих моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов энергетических параметров СРД

	θ_u	φ	θ_i	I, А	$\cos \varphi$	η
Схема замещения	0,011	0,8538	0,728	9,791	0,657	0,814
Динамическая модель	0,011	0,8538	0,728	9,791	0,657	0,814

По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

- совпадение значений энергетических характеристик двигателя, полученных при расчете схемы замещения и динамической модели, показывает пригодность описанной схемы замещения для расчета характеристик установившегося режима работы СРД;

- при условии предварительного определения макроскопических параметров схемы замещения (расчетного или экспериментального), данный подход позволяет рассчитывать энергетические характеристики СРД, а также находить аналитические выражения для их определения;

- описанная схема хорошо подходит для расчета характеристик СРД, работающего совместно с преобразователем частоты в замкнутой системе ЭП, поскольку параметры схемы зависят от угла θ_i , задаваемого системой управления. Также модель позволяет легко учитывать изменение амплитуды и частоты питающего напряжения;

- все это позволяет применять описанную схему замещения для расчета рабочих и энергетических характеристик СРД на стадии проектирования с целью определения эффективности применяемых решений для достижения высокого класса энергоэффективности двигателя, до изготовления опытного образца.

Библиографический список

1. Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Дмитриевский А.А., Сафин Н.Р. Энергоэффективные синхронные реактивные двигатели для насосных, вентиляторных и компрессорных приложений // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии ЭКСИЭ – 03: Сборник докладов 3-й международной научно-практической конференции. Екатеринбург, кафедра ЭЭС УрФУ, 15-17 мая 2013 г. Екатеринбург: УрФУ, С. 148-151.
2. Берлин Е.М. Системы частотного управления синхронно-реактивными двигателями / Е.М. Берлин, Б.А. Егоров, В.Д. Кулик, И.С. Скосырев. Л.: Энергия, 1968. 132 с.
3. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. “Электромеханика”, 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 472 с.
4. Brown G. Developing synchronous reluctance motors for variable speed operation // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). 6th IET International Conference on. 27-29 March 2012. P. 1-6.