

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Канов Л.Н., к.т.н., доц.  
Севастопольский национальный технический университет  
Украина, 99053, Севастополь, Стрелецкая бухта, СевНТУ,  
кафедра "Судовые и промышленные электромеханические системы"  
тел. (0692) 235-160

*Запропоновано ефективну чисельну методику параметричного синтезу механічних характеристик асинхронного двигуна, яка призначена для автоматизованого вибору додаткових опорів в кілах двигуна по критерію близькості бажаної і фактичної характеристик на основі методу схемного моделювання.*

*Предложена эффективная численная методика параметрического синтеза механических характеристик асинхронного двигателя, предназначенная для автоматизированного выбора дополнительных сопротивлений в цепях двигателя по критерию близости желаемой и фактической характеристик на основе метода схемного моделирования.*

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленности используется большое количество промышленных механизмов, работающих с изменяющейся скоростью, среди которых видное место занимают регулируемые электроприводы с асинхронными двигателями. Большое распространение имеет реостатное регулирование скорости двигателей. Кроме того, существует возможность регулирования скорости изменением напряжения, приложенного к двигателю, что может быть достигнуто включением сопротивлений в цепь статора. Реостатное регулирование благодаря своей простоте находит применение, например, в приводах подъемно-транспортных устройств, вентиляторов, насосов небольшой мощности. Реостатные характеристики отличаются небольшой жесткостью, уменьшающейся с ростом сопротивлений, причем обычно полагается, что рабочая часть характеристики линейна. Поэтому при расчете сопротивлений дополнительных резисторов часто пользуются методами, аналогичными методом, применяемым для расчетов сопротивлений двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Более точные результаты получаются при спрямлении характеристики [1–3].

С развитием теории электрических цепей и средств их расчета появляется возможность автоматизированного выбора дополнительных сопротивлений с применением технологии параметрической оптимизации на основе схемных моделей асинхронных двигателей. В статье обосновывается методика расчета дополнительных сопротивлений в цепях асинхронного двигателя с целью максимального приближения его механической характеристики к желаемому виду.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Зададимся желаемым видом механической характеристики асинхронного двигателя в виде отрезка прямой, проходящей через начало координат плоскости "скольжение–момент":  $M = k \cdot s$ , где  $k$  – угловой коэффициент. Введем критерий близости желаемой и реальной характеристик в виде интеграла

$$J = \int_0^{s_f} (\Delta M)^2 \cdot ds, \quad (1)$$

где  $M(s) = 1,5 \cdot x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr})$  – момент двигателя;  $\Delta M = M(s) - k \cdot s$ ;  $x_m(i_\delta)$  – сопротивление взаимной индукции фазы статорной и роторной обмоток, зависящее от намагничивающего тока  $i_\delta = \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2}$ ;  $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$  – продольные и поперечные составляющие токов статора и ротора;  $s_f$  – граница рабочей части механической характеристики. Зависимость сопротивления взаимной индукции от намагничивающего тока может быть аппроксимирована в соответствии с характеристикой холостого хода двигателя аналитической зависимостью, например, вида  $x_m(i_\delta) = \frac{a \cdot \arctg(bi_\delta)}{i_\delta} + c$ .

Необходимо таким образом выбрать сопротивление в цепи статора  $r_s$  и в цепи ротора  $r_r$ , чтобы критерий близости  $J$  принял минимальное значение, при этом желаемая и фактическая характеристики будут отличаться наименьшим образом. Вычитая из полученных значений  $r_s$  и  $r_r$  их номинальные величины, можно получить значения дополнительных сопротивлений в цепях двигателя.

### МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для применения эффективных методов минимизации критерия (1) необходимо получить компоненты градиента  $J$  по параметрам  $r_s$  и  $r_r$ . Дифференцирование выражения (1) дает

$$\frac{dJ}{dr_j} = 2 \int_0^{s_f} \Delta M \cdot \frac{d\Delta M}{dr_j} \cdot ds, \quad (2)$$

где  $\frac{d\Delta M}{dr_j} = 1,5 \cdot \left[ \frac{dx_m(i_\delta)}{dr_j} \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \right] +$

$$+1,5 \cdot \left[ x_m \left( \frac{di_{qs}}{dr_j} \cdot i_{dr} + \frac{di_{dr}}{dr_j} \cdot i_{qs} - \frac{di_{ds}}{dr_j} \cdot i_{qr} - \frac{di_{qr}}{dr_j} \cdot i_{ds} \right) \right];$$

$$\frac{dx_m(i_\delta)}{dr_j} = \frac{a}{i_\delta^2} \cdot \frac{di_\delta}{dr_j} \cdot \left( \frac{bi_\delta}{1+(bi_\delta)^2} - \arctg(bi_\delta) \right);$$

$$\frac{di_\delta}{dr_j} = \frac{1}{i_\delta} \cdot \left[ (i_{ds} + i_{dr}) \cdot \left( \frac{di_{ds}}{dr_j} + \frac{di_{dr}}{dr_j} \right) + (i_{qs} + i_{qr}) \cdot \left( \frac{di_{qs}}{dr_j} + \frac{di_{qr}}{dr_j} \right) \right]; j = s, r.$$

Как следует из приведенных выражений, компоненты градиента  $\frac{dJ}{dr_s}, \frac{dJ}{dr_r}$  зависят от функций чувствительности первого порядка

$$\frac{di_{qs}}{dr_j}, \frac{di_{dr}}{dr_j}, \frac{di_{qr}}{dr_j}, \frac{di_{ds}}{dr_j}, j = s, r. \quad (3)$$

Чтобы вычислить критерий (1), воспользуемся предложенной нами схемной моделью асинхронного двигателя в стационарном режиме [4], которая строится на основании уравнений в координатах, вращающихся с синхронной скоростью, и с учетом насыщения магнитной цепи:

$$r_s \cdot i_{ds} - x_{\sigma s} \cdot i_{qs} - x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr}) = u_{ds};$$

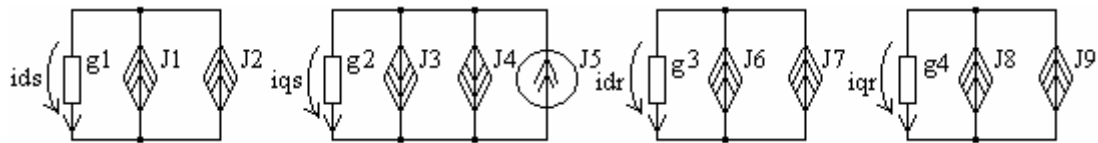


Рис. 1. Схемная модель асинхронного двигателя

Для вычисления функций чувствительности первого порядка (3) построим схемы в производных [5] по параметрам  $r_s$  и  $r_r$ . Эти схемы получаются дифференцированием компонентных соотношений схемной модели по параметрам и также представляют не-

$$r_s \cdot i_{qs} + x_{\sigma s} \cdot i_{ds} + x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr}) = u_{qs};$$

$$r_r \cdot i_{dr} - s \cdot x_{\sigma r} \cdot i_{qr} - s \cdot x_m(i_\delta) \cdot (i_{qr} + i_{qs}) = 0;$$

$$r_r \cdot i_{qr} + s \cdot x_{\sigma r} \cdot i_{dr} + s \cdot x_m(i_\delta) \cdot (i_{dr} + i_{ds}) = 0,$$

где  $x_{\sigma s}, x_{\sigma r}$  – сопротивления рассеивания статора и ротора. Схемная модель представляет собой нелинейную электрическую цепь постоянного тока и имеет вид, изображенный на рис.1, где обозначены линейные проводимости:  $g1 = g2 = r_s, g3 = g4 = r_r$ ; линейные управляемые источники тока:  $J1 = x_{\sigma s} i_{qs}, J3 = x_{\sigma s} \cdot i_{ds}, J6 = s x_{\sigma r} i_{qr}, J8 = s \cdot x_{\sigma r} \cdot i_{dr}$ ; нелинейные управляемые источники тока:  $J2 = x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr}), J4 = x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr}), J7 = s \cdot x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr}), J9 = s \cdot x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr})$ ; независимый источник тока  $J5 = u_{qs} = -1$  – напряжение сети (полагаем здесь  $u_{ds} = 0$ ). В этой модели напряжения на проводимостях  $g1, g2$  численно равны продольной и поперечной составляющим тока статора; на проводимостях  $g3, g4$  – аналогичным составляющим тока ротора. Расчет этой модели при заданном значении скольжения  $s$  существующим программным обеспечением позволяет определить составляющие токов статора и ротора в стационарном режиме.

линейные цепи постоянного тока. На рис. 2 изображена схема в производных по  $r_s$  схемной модели двигателя, на которой обозначены линейные проводимости:  $g1 = g2 = r_s$ ,

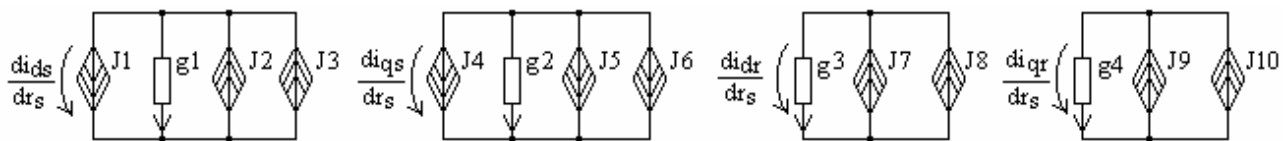


Рис. 2. Схема в производных по сопротивлению статора

$g3 = g4 = r_r$ ; линейные управляемые источники тока:

$$J1 = 1 \cdot i_{ds}, J2 = x_{\sigma s} \cdot \frac{di_{qs}}{dr_s}, J4 = 1 \cdot i_{qs}, J5 = x_{\sigma s} \cdot \frac{di_{ds}}{dr_s},$$

$$J7 = s \cdot x_{\sigma r} \cdot \frac{di_{qr}}{dr_s}, J9 = s \cdot x_{\sigma r} \cdot \frac{di_{dr}}{dr_s}; \text{ нелинейные}$$

управляемые источники тока:

$$J3 = \frac{d}{dr_s} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr})),$$

$$J6 = \frac{d}{dr_s} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr})),$$

$$J8 = s \cdot \frac{d}{dr_s} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr})),$$

$$J10 = s \cdot \frac{d}{dr_s} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr})).$$

В этой схеме напряжения на проводимостях  $g1, g2$  численно равны функциям чувствительности  $\frac{di_{ds}}{dr_s}, \frac{di_{qs}}{dr_s}$ , а на проводимостях  $g3, g4$  – функциям

чувствительности  $\frac{di_{dr}}{dr_s}, \frac{di_{qr}}{dr_s}$ . Отметим, что источники тока  $J1, J4$  управляются токами  $i_{ds}, i_{qs}$  схемной модели двигателя по рис. 1.

Аналогично на рис. 3 изображена схема в производных по  $r_r$  схемной модели двигателя, где обозна-

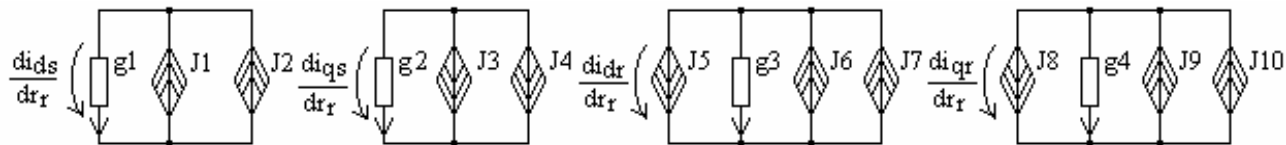


Рис. 3. Схема в производных по сопротивлению ротора

$$J3 = x_{\sigma s} \cdot \frac{di_{ds}}{dr_r}, \quad J5 = 1 \cdot i_{dr}, \quad J6 = s \cdot x_{\sigma r} \cdot \frac{di_{qr}}{dr_r},$$

$$J8 = 1 \cdot i_{qr}, \quad J9 = s \cdot x_{\sigma r} \cdot \frac{di_{dr}}{dr_r};$$

нелинейные управляемые источники тока:  $J2 = \frac{d}{dr_r} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr}))$ ,

$$J4 = \frac{d}{dr_r} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr})), \quad J7 = s \cdot \frac{d}{dr_r} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{qs} + i_{qr})),$$

$J10 = s \cdot \frac{d}{dr_r} (x_m(i_\delta) \cdot (i_{ds} + i_{dr}))$ . Напряжения на проводимостях  $g1, g2$  численно равны функциям чувствительности  $\frac{di_{ds}}{dr_r}, \frac{di_{qs}}{dr_r}$ , а на проводимостях  $g3, g4$  –

функциям чувствительности  $\frac{di_{dr}}{dr_r}, \frac{di_{qr}}{dr_r}$ . Источники тока  $J5, J8$  управляются токами  $i_{dr}, i_{qr}$  схемной модели.

Таким образом, расчет режима нелинейной цепи, состоящей из схемной модели на рис. 1 и двух схем в производных на рис. 2, 3 при заданном скольжении  $s$  позволяет определить составляющие токов статора и ротора и их функции чувствительности (3) по параметрам  $r_s$  и  $r_r$ , а следовательно рассчитывать значение критерия близости (1) и компоненты градиента критерия (2). Вычисление критерия осуществляется подсчетом интеграла в (1) при разбиении интервала  $0 - s_f$  на достаточное число частей и соответствующим просчетом схемной модели по рис. 1. Вычисление компонент градиента осуществляется на этом же разбиении  $s$  одновременным просчетом как схемной модели, так и схем в производных по рис. 2, 3.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для минимизации критерия (1) применяется один из современных эффективных методов [6]. В качестве иллюстрации рассмотрим процесс синтеза механической характеристики асинхронного двигателя мощностью 14 кВт с напряжением 380 В и током 28 А. Значение коэффициента  $k$  в (1) принято  $k = 3$ ,

линейные проводимости:  $g1 = g2 = r_s$ ,  $g3 = g4 = r_r$ ; линейные управляемые источники тока:

$$J1 = x_{\sigma s} \cdot \frac{di_{qs}}{dr_r},$$

граничное значение скольжения  $s_f = 0,3$ . Ход процесса минимизации критерия отражен в таблице 1, где представлены значения критерия, градиента и оптимизируемых сопротивлений на каждом шаге процесса с начальными значениями сопротивлений  $r_s = 0,1$  о.е.,  $r_r = 0,15$  о.е.

Таблица 1

Ход процесса минимизации				
$J$	$\frac{dJ}{dr_s}$	$\frac{dJ}{dr_r}$	$r_s, \text{о.е.}$	$r_r, \text{о.е.}$
0,00588	0,0682	0,0806	0,175	0,268
0,00207	0,0402	0,0684	0,108	0,342
0,000111	-0,00254	-0,0010	-0,065	0,416

Анализ таблицы показывает, что после второго шага достигнуто минимальное значение критерия близости желаемой и полученной механической характеристики  $J = 0,00207$  при значениях сопротивлений  $r_s = 0,108$  о.е.,  $r_r = 0,342$  о.е. Результаты процедуры параметрического синтеза изображены на рис. 4, где индексом 1 помечена желаемая, а индексом 2 – полученная характеристика. Из рисунка следует, что на интервале изменения скольжения от  $s = 0$  до  $s_f = 0,3$  эти характеристики достаточно близки. Оптимальное сопротивление статора практически совпадает с его номинальным значением 0,096 о.е., а сопротивление ротора больше его номинального значения 0,142 о.е. в 2,4 раза. Таким образом, дополнительное сопротивление 0,2 о.е. в цепи ротора позволяет получить желаемый вид механической характеристики.

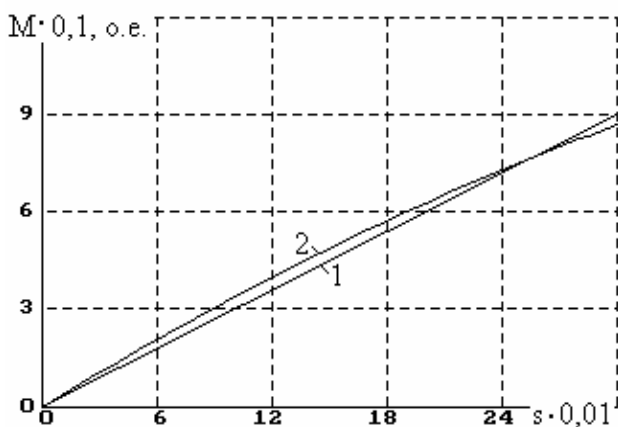


Рис.4. Механические характеристики асинхронного двигателя: 1 – желаемая; 2 – полученная

Отметим, что описанный процесс оптимизации не заканчивается на двух шагах. После выполнения третьего шага, например, значение критерия уменьшается на порядок, что говорит о почти полном совпадении желаемой и полученной характеристик. Об этом же свидетельствуют и малые значения компонент градиента, которые, как известно, в точке экстремума функции нескольких переменных равны нулю. Однако, как следует из таблицы 1, минимум разности желаемой и полученной характеристик достигается ценой изменения знака сопротивления статора. Очевидно, реализация этого условия затруднена. Возможным выходом может быть увеличение напряжения на статоре пропорционально току на основе полупроводниковых преобразователей.

Для получения следующих значений сопротивлений  $r_s$  и  $r_r$ , соответствующих другому виду желаемой характеристики, следует задать новые значения коэффициента  $k$  и граничного скольжения  $s_f$  в критерии (1) и повторить процедуру синтеза. Таким образом, можно получить ряд сопротивлений для формирования семейства механических характеристик.

#### ВЫВОДЫ

Разработана методика построения схемной модели асинхронного двигателя, а также методика построения схем в производных первого порядка, позволяющих рассчитывать коэффициенты чувствительности параметров режима к изменению сопротивлений в цепи статора и ротора двигателя. Показано, что эта схемная модель и схемы в производных представляют собой электрические цепи, состоящие из линейных и нелинейных сопротивлений, проводимостей, управляемых и независимых источников тока, которые могут быть рассчитаны существующим программным обеспечением.

Эффективность предлагаемого направления оптимизации для электромеханического устройства со сложным математическим описанием проиллюстрирована на примере оптимизации механических характеристик электропривода переменного тока на основе асинхронного двигателя.

Предлагаемая методика параметрического синтеза механических характеристик асинхронного двига-

теля предназначена для автоматизированного выбора дополнительных сопротивлений в цепях двигателя по критерию близости желаемой и реальной характеристик. Эта методика позволяет учесть насыщение магнитной цепи двигателя путем аппроксимации зависимости сопротивления взаимной индукции от намагничивающего тока. Методика может быть распространена и на двигатели, в которых необходимо учитывать эффект вытеснения тока в пазу, а также на оптимизацию тяговых электроприводов постоянного тока. Перспективным в этом направлении является, очевидно, схемное моделирование и оптимизация динамических режимов электроэнергетических устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
- [2] Мокін Б.И. Оптимізація електроприводов. – Вінниця: Універсум – Вінниця, 2004. – 250 с.
- [3] Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- [4] Канов Л.Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока // Электротехника та електроенергетика. – 2004. – №1. – С. 5-9.
- [5] Канов Л.Н. Параметрическая оптимизация электромеханических устройств на основе схемного моделирования // Вестник СевГТУ. Вып. 63: Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр.; Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2005. – С. 86-92.
- [6] Канов Л.Н. Параметрическая оптимизация электрических цепей методом ортогональных траекторий // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1991. – №1. – С. 27-30.

Поступила 11.10.2005