

- По условию сборки определяется число спутников. Из всех значений  $Z_{ij}$  и  $k$  выбираются такие сочетания, при которых  $\gamma$  – целое число.

- Начиная с минимального значения  $Z_4 = 85$  вычисляются число зубьев во втором ряду спутников, увеличивая в каждом цикле значения на единицу, пока не будут выполнены поставленные условия: соосности и сборки.

Изложенная методика позволяет найти вполне определенное соотношение чисел зубьев по заданному критерию оптимальности (минимальные габариты), обеспечить заданное передаточное отношение, выполнить все дополнительные условия синтеза. При этом по сравнению с традиционными методиками данный метод исключает громоздкие расчеты, связанные с разложением передаточного отношения на сомножители.

### Библиографический список

1. *Марченко С. И. и др.* Теория механизмов и машин. Конспект лекций для сдачи экзаменов в технических вузах. Ростов н/Д., Феникс, 2003. 256 с.

2. *Попов С. А., Тимофеев Г. А.* Курсовое проектирование по теории механизмов и механике машин: учеб. пособие для вузов / под ред. К. В. Фролова. 3-е изд., М.: Высш. шк., 1999.

3. *Теория механизмов и механика машин: учеб. для вузов / К. В. Фролов, С. А. Попов, А. К. Мусатов и др.; под ред. К. В. Фролова.* 5-е изд., стереотип. М.: Высш. шк., 2004.

**Р. С. Кириллов,  
М. Е. Садовников**

## **ПРОБЛЕМА СИНТЕЗА СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В нашей стране около 60% всей вырабатываемой энергии потребляется всеми видами электропривода [1]. В начале 1980-х гг. асинхронные двигатели потребляли порядка 40% всей вырабатываемой электроэнергии. Наиболее распространены асинхронные двигатели на рабочее напряжение до 1000 В. Из них асинхронные двигатели мощностью от 0,75 до 100 кВт потребляли порядка 90% электроэнергии от общего ее потребления всеми видами асинхронных двигателей [2]. В последнее время удельный вес

электроприводов на базе асинхронных двигателей неуклонно растет в связи с широким распространением частотно-регулируемого привода, а значит, растет и значимость вопроса совершенствования и удешевления данного привода, поскольку он в значительной мере позволяет оптимизировать энергопотребление, улучшить его рабочие характеристики, срок службы, повысить надежность.

На практике часто возникают вопросы, связанные с заменой приводов постоянного тока на приводы с преобразователями частоты с векторным управлением или заменой существующего нерегулируемого асинхронного электропривода на регулируемый с векторной системой управления.

Для того чтобы такая замена была произведена корректно, необходимо предварительно произвести моделирование такой технической системы с новым видом электропривода. Основная сложность при моделировании векторной системы управления – это определение базисных величин, необходимых для работы модели.

Рассмотрим основной принцип построения векторной системы управления. Идея векторной системы управления асинхронным двигателем заключается в реализации раздельного управления скоростью и потокоцеплением. Ток двигателя измеряется в неподвижной системе координат  $x - y$  и преобразуется во вращающуюся систему координат  $\alpha - \beta$  (рис. 1).

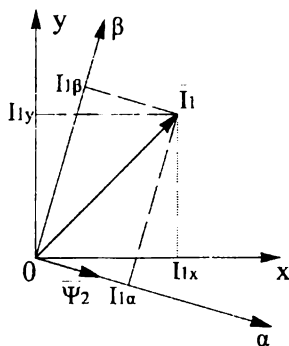


Рис. 1. Система координат  $\alpha - \beta$  в системе координат  $x - y$

При ориентации оси  $\alpha$  по вектору потокоцепления ротора проекция вектора  $I_{1\alpha}$  определяет величину потокоцепления, а проекция  $I_{1\beta}$  пропорциональна скорости вращения вала двигателя.

Между системами управления электроприводом с асинхронным двигателем и с двигателем постоянного тока можно провести аналогию, которая видна на структурных схемах (рис. 2). Это позволяет сделать вывод, что управление координатами электропривода переменного тока становится аналогично управлению координатами электропривода постоянного тока.

Приводимая на рисунке 2 структурная схема асинхронного двигателя служит для пояснения принципа управления асинхронной машиной и является упрощенной. Для реализации модели полной структурной схемы системы электропривода [3] необходимо задаться базисными значениями координат электропривода, выполнить расчет параметров регуляторов и обратных связей.

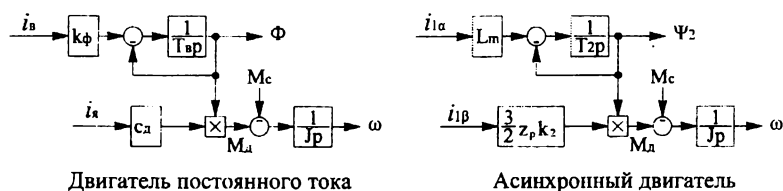


Рис. 2. Аналогия между структурными схемами двигателей:

$i_b$  – ток возбуждения;  $i_a$  – ток якоря;  $T_b$  – постоянная времени обмотки возбуждения;  $k_\phi$  – конструктивный коэффициент;  $c_d$  – постоянная двигателя;  $J$  – момент инерции;  $M_d$  – момент двигателя;  $M_c$  – момент сопротивления;  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  – реактивная и активная составляющая тока статора;  $T_2$  – электромагнитная постоянная;  $k_2$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;  $z_p$  – число пар полюсов

В работе решается проблема выбора базисных величин для структурной схемы, являющейся основой математической модели. При определении базисных величин основной задачей является определение амплитудных значений проекций тока статора, а также модуля потокоцепления ротора.

Исходными уравнениями для расчета являются основные уравнения асинхронной машины [5]:

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) - \dot{U}_1$$

где  $I_1$  – ток статора двигателя в номинальном режиме, А;  
 $U_1$  – номинальное фазное напряжение на статоре, В;

$R_1$  – активное сопротивление фазы статора, Ом;

$X_1$  – индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора, Ом.

и уравнение ЭДС при холостом ходе АД:

$$\dot{E}_1 = -(R_m + jX_m) \cdot \dot{I}_0$$

где  $R_m$  – фиктивное активное сопротивление, характеризующее магнитные потери, Ом;

$X_m$  – индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом;

Зная коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) можно записать ток статора в комплексном виде:

$$\dot{I}_1 = I_1 \cdot \cos \varphi - j I_1 \cdot \sin \varphi$$

После ряда преобразований получим формулы расчета проекций токов статора:

$$I_{1\alpha} = \sqrt{2} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\left( \frac{-R_1 \cdot \sin \varphi - X_1 \cdot \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left( \frac{X_1 \cdot \sin \varphi + R_1 \cdot \cos \varphi - \frac{U_1}{I_1}}{X_m} \right)^2}$$
$$I_{1\beta} = \sqrt{(\sqrt{2} \cdot I_1)^2 - (I_{1\alpha})^2}$$

где  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности двигателя в номинальном режиме.

Модуль потокосцепления ротора:

$$\Psi_2 = L_m \cdot I_{1\alpha}$$

$L_m$  – главная индуктивность двигателя.

Найдем базисные значения основных координат электропривода:

$U_6 = \sqrt{2} \cdot U_{\phi.n}$  – амплитудное значение номинального фазного напряжения обмотки статора, В;

$I_{1\alpha 6} = k_{\text{чп1}} \cdot I_{1\alpha}$  – ток в канале потокосцепления двигателя, А;  $I_{1\beta 6}$

$I_{1\beta 6} = k_{\text{чп1}} \cdot I_{1\beta}$  – ток в канале скорости двигателя, А;

$\omega_6 = 2 \cdot \pi \cdot f_{c.n}$  – номинальная угловая частота напряжения статора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\omega_{r,6} = \frac{\omega_6}{z_p}$  – угловая частота вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$$M_6 = k_n \cdot \frac{P_n}{\omega_{r,6}} - \text{электромагнитный момент, Н} \cdot \text{м};$$

$\Psi_{26} = \Psi_2$  – потокосцепление ротора, Вб;

где  $k_{\text{ТП}}$  – перегрузочный коэффициент преобразователя, ( $k_{\text{ТП}} = 1 \dots 2$ );

$Z_p$  – число пар полюсов асинхронной машины;

$k_n$  – кратность пускового момента двигателя.

С целью оценки точности полученных расчетных формул были произведены расчеты для ряда асинхронных двигателей с известными параметрами, полученными для Т-образной схемы замещения по методу, предложенному в [5].

Расчет электромагнитного момента АД производился по формуле:

$$M_{\text{э,расч.}} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot k_2 \cdot \Psi_2 \cdot I_{1\beta}$$

где  $k_2$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;

Точное значение электромагнитного момента определялось по формуле

$$M_s = \frac{P_n}{\omega_p}$$

где  $\omega_p$  – частота вращения ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;

$P_n$  – номинальная мощность на валу двигателя, Вт.

Результаты расчета сведены в таблицу.

Результаты расчета

Тип электро-двигателя	Мощность на валу $P_n$ , кВт	Число пар полюсов $p_n$	Момент $M_s$ , Нм	Базисные величины				Ошибка расчета $M_s$ , %
				$I_{1x}$	$I_{1y}$	$\Psi_2$	$M_{\text{э,расч.}}$	
A132M2	11	1	36,63	12,51	27,69	0,92	37,41	-2,14
A132M4	11	2	72,95	13,13	28,12	0,92	75,10	-2,95
AHP160S6	11	3	108,29	17,46	28,70	0,91	111,95	-3,38
A280S2	110	1	354,87	51,89	264,55	0,95	369,22	-4,04
A280S4	110	2	714,57	86,47	258,49	0,95	714,88	-0,04
A315S6	110	3	1064,26	68,90	260,09	0,94	1073,36	-0,86
A315M2	200	1	641,32	160,64	464,06	0,95	643,67	-0,37
A315M4	200	2	1286,97	366,97	478,65	0,95	1280,47	0,51
A355SMB6	200	3	1923,32	179,82	480,31	0,93	1913,48	0,51

Для рассчитанных асинхронных двигателей относительные величины проекций тока статора находятся в пределах:

$I_{1\alpha}^* = 0,18 \dots 0,7$  о.е. причем большее значение соответствует меньшему значению  $\cos\varphi$ ;

$I_{1\beta}^* = 0,87 \dots 0,95$  о.е. причем большее значение соответствует меньшему значению КПД.

При выборе относительного значения тока необходимо исходить из тождества  $\sqrt{(I_{1\alpha}^*)^2 + (I_{1\beta}^*)^2} = 1$  и, для получения минимальной ошибки, имеет смысл задаться проекцией тока  $I_{1\beta}^*$  (т. к. диапазон изменения величины наименьший) и найти  $I_{1\alpha}^*$  из этого тождества.

На базе предложенного метода расчета проекций была смоделирована векторная система управления с ориентацией по потокоцеплению ротора. Результаты моделирования показали, что расчетные величины проекций токов и потокоцепление имеют погрешность расчета менее 1%. Погрешность по электромагнитному моменту составила порядка 1%.

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о возможности применения предлагаемого метода расчета для построения математических моделей векторных систем управления ЭП с приемлемой для инженерных расчетов точностью получения базисных значений координат электропривода.

#### Библиографический список

1. *Москаленко В. В.* Электрический привод: учеб. для высш. учеб. заведений / В. В. Москаленко. М.: Академия, 2007.
2. *Радин В. И.* Электрические машины. Асинхронные машины: учеб. для электромех. спец. вузов / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович; под ред. И. П. Копылова. М.: Высш. шк., 1988.
3. *Терехов В. М.* Системы управления электроприводов: учеб. для студентов вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов; под ред. В. М. Терехова. 3-е изд., стереотип. М.: Академия, 2008.
4. *Копылов И. П.* Электрические машины: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. *Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кириякин А. А.* Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4/98.