УДК 62-83:621.313.3:621.317

В.В.АЛЕКСЕЕВ, *канд. техн. наук, доцент, alexeevvv@spmi.ru*
В.И.ВЕРШИНИН, *канд. техн. наук, доцент, 328-82-70*
Б.Ю.ВАСИЛЬЕВ, *аспирант, obelisk198720075@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет

V.V.ALEKSEEV, *PhD in eng. sc., associate professor, alexeevvv@spmi.ru*
V.I.VERSHININ, *PhD in eng. sc., associate professor, 328-82-70*
B.Y.VASILYEV, *post-graduate student, obelisk198720075@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕКТОРОВ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрены косвенный и непосредственный способы определения параметров векторов главного потокосцепления. Даны результаты экспериментальных и теоретических исследований. Показано, что при высокой точности датчиков мгновенных значений тока и напряжения оба способа вполне конкурентоспособны, а с учетом тяжелых условий эксплуатации в горной и нефтегазовой промышленности косвенный способ можно считать более предпочтительным.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, опорный вектор, главное потокосцепление, потокосцепление ротора.

DEFINITION OF PARAMETERS OF VECTORS OF MAGNETIC FLUX IN ELECTRIC DRIVES WITH THE VECTOR CONTROL

Indirect and direct ways of definition of parameters of vectors of the main magnetic flux consider. Results of experimental and theoretical researches are given. It shows, that at exact measuring instruments of a electric current and an voltage, both ways are rather competitive, and in view of heavy conditions actions in oil-and-gas and a mining industry, the indirect way of definition could be counted up more preferable.

Key words: the asynchronous engine, vector management, a basic vector, the main magnetic flux, magnetic flux of rotor.

Анализ технической литературы показывает, что в современных технологических комплексах горной и нефтегазовой отрасли широкое распространение находят автоматизированные частотно-регулируемые электроприводы с алгоритмом векторного управления [1-3]. Это обстоятельство объясняется двумя причинами:

- в качестве исполнительных двигателей в таких электроприводах используются надежные, дешевые, не требующие постоянного технического обслуживания, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором;
- по своим динамическим свойствам частотно-регулируемые электроприводы с векторным управлением не уступают электроприводам постоянного тока.

Частотно-регулируемые электроприводы с векторным управлением основаны на автономном управлении составляющими обобщенного вектора тока относительно опорного, в качестве которого обычно выступает либо обобщенный вектор главного потокосцепления машины Ψ_0, либо обобщенный вектор потокосцепления ротора Ψ_r.

На практике применяются два способа определения параметров векторов потокосцепления, которые используются в частотно-регулируемых электроприводах: прямой и косвенный. При прямом способе в расточку статора исполнительного двигателя устанавливается датчики. Они позволяют осуществить точную фиксацию составляющих вектора главного потокосцепления Ψ_0 относительно неподвижной системы координат статора α, β. Сигналы датчиков соответствуют значению магнитного поля в данный момент в месте установки датчиков. При этом вектор потокосцепления ротора оценивается в соответствии с выражением

$$\dot{\Psi}_r = (\dot{\Psi}_0 / k_r) - L_r(1 - k_r)\dot{I}_s, \qquad (1)$$

где k_r – коэффициент потокосцепления ротора; L_r – индуктивность рассеяния ротора.

При косвенном определении параметров потокосцеплений пользуются исключительно расчетными методами, в основе которых лежит система дифференциальных уравнений Парка-Горева, которые широко используются при исследовании переходных процессов в асинхронных электрических машинах:

$$\frac{d}{dt}\Psi_{s\alpha} = U_{s\alpha} - I_{s\alpha}R_s; \qquad (2)$$

$$\frac{d}{dt}\Psi_{s\beta} = U_{s\beta} - I_{s\beta}R_s; \qquad (3)$$

$$\frac{d}{dt}\Psi_{r\alpha} = -\frac{R_r}{\sigma L_r}\Psi_{r\alpha} - p_0\omega\Psi_{r\beta} + \frac{k_s R_r}{\sigma L_r}\Psi_{s\alpha}; \qquad (4)$$

$$\frac{d}{dt}\Psi_{r\beta} = -\frac{R_r}{\sigma L_r}\Psi_{r\beta} + p_0\omega\Psi_{r\alpha} + \frac{k_s R_r}{\sigma L_r}\Psi_{s\beta}; \qquad (5)$$

$$\frac{d}{dt}\omega = \frac{mp_o}{2J}\left(\Psi_{0\alpha}I_{s\beta} - \Psi_{0\beta}I_{s\alpha}\right) - M_c J^{-1}; \qquad (6)$$

$$\Psi_{0\alpha} = \Psi_{s\alpha} - \sigma_s L_s I_{s\alpha}; \qquad (7)$$

$$\Psi_{o\beta} = \Psi_{s\beta} - \sigma_s L_s I_{s\beta}; \qquad (8)$$

$$I_{s\alpha} = (\Psi_{s\alpha} - k_r\Psi_{r\alpha})/(\sigma L_s); \qquad (9)$$

$$I_{s\beta} = (\Psi_{s\beta} - k_r\Psi_{r\beta})/(\sigma L_s), \qquad (10)$$

где I_s, Ψ_0, Ψ_s, Ψ_r, U_s – проекции обобщенного вектора тока статора, главного потокосцепления, потокосцепления статора и ротора, напряжения статора на оси α-β; R_s, R_r – активные сопротивления статора и ротора; $\sigma_s = 1 - k_s$ – коэффициент рассеяния статора; $\sigma = 1 - k_s k_r$ – коэффициент полного рассеяния; $k_s = L_m/L_s$ – коэффициент потокосцепления статора; $k_r = L_m/L_r$ – коэффициент потокосцепления ротора; L_s – индуктивность статора; L_m – взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора; $\sigma L_s = L'_s$ и $\sigma L_r = L'_r$ – переходные индуктивности статора и ротора; m и p_0 – число фаз статора и число пар полюсов; ω – частота вращения ротора; J – момент инерции; M_c – статический момент нагрузки.

Заметим, что другие электромагнитные переменные определяются по формулам

$$I_{r\alpha} = \left(\Psi_{r\alpha} - k_s\Psi_{s\alpha}\right)/\left(\sigma L_r\right);$$
$$I_{r\beta} = \left(\Psi_{r\beta} - k_s\Psi_{s\beta}\right)/\left(\sigma L_r\right). \qquad (11)$$

Уравнение, полученное на основании (1, 2) и (7, 8),

$$\frac{d}{dt}\Psi_0 = U_s - I_s R_s - \sigma_s L_s \frac{d}{dt} I_s \qquad (12)$$

может служить для определения вектора главного потокосцепления, так как интегрирование правой его части обеспечивает его оценку

$$\dot{\Psi}_0 = \int_0^t \left(\dot{U}_s - \dot{I}_s R_s\right) d\tau - L_s\sigma_s\dot{I}_s + \dot{\Psi}_0(0) =$$
$$= \dot{\Psi}_s - L_s\sigma_s\dot{I}_s + \dot{\Psi}_0(0). \qquad (13)$$

Сравнительные результаты определения параметров вектора главного потокосцепления, полученные экспериментальным путем, при исследовании макетного образца частотно-регулируемого электропривода турбомеханизма показали следующее. Перед проведением эксперимента в расточку статора исполнительного двигателя для непосредственного измерения вектора главного потокосцепления были установлены датчики Холла типа ДКХ-7А. Для косвенного измерения использовалась микропроцессорная система управления, программный продукт которой реализовывал структурную схему, собранную из библиотечных блоков пакета прикладных программ Matlab (рис.1).

В качестве датчиков текущих значений тока и напряжения применялись стандартные трансформаторы тока и напряжения, установленные в статическом преобразователе частоты ТК-40-50/5 (ГОСТ 7146-78); Т3I3 (ОЛГ140.083.ТО).

Измеряемые с помощью датчика Холла $\psi^{\alpha}_{0ДХ}$ и вычислителя $\psi^{\alpha}_{0ВП}$ сигналы составляющей вектора главного потокосцепления, наряду с другими сигналами, подавались на дисплей монитора. На рис.2 изображены диаграммы изменения координат электропривода в процессе пуска и разгона исполнительного двигателя до номинальной частоты вращения. Пуск и разгон осуществлялись при векторном управлении с использованием опорного вектора главного потокосцепления, определяемого с помощью датчиков Холла.

Сравнительный анализ результатов определения параметров вектора главного потокосцепления показывает, что при низких частотах напряжения и тока статора исполнительного двигателя наблюдаются расхождения параметров вектора, полученных прямым и косвенным методом. Это значит, что ошибка при использовании косвенного метода достигает 10-15 %. Это связано с тем, что в процессе эксперимента использовались трансформаторные датчики тока и напряжения, которые при малых частотах имеют большую погрешность.

Для получения высоких показателей регулирования в широком диапазоне управления скоростью машины переменного тока необходимо для реализации вычислителя составляющих обобщенного вектора главного потокосцепления применять высокоточные датчики мгновенных значений напряжений и токов, например датчики производства фирмы LEM, погрешность которых во всем диапазоне измеряемых частот менее 1-2 %.

Кроме требования высокой точности датчиков мгновенных значений напряжения и тока, следует учитывать наличие в расчетных уравнениях Парка-Горева параметров исполнительного двигателя (R_s, L_s, L_m, L_r). Эти параметры, как известно, определяются режимом работы двигателя. Если не учитывать изменения параметров при косвенном измерении составляющих векторов потокосцеплений, то ошибка в ориентации вращающейся системы координат по направлению вектора потокосцепления может быть значительной (более 5 %). Это вызовет заметное снижение качества регулирования системы и потери преимуществ векторного управления [3].

Наибольшее влияние на точность косвенных вычислений оказывают (в зависимости от вида опорного вектора) температурные изменения сопротивлений обмоток ротора и статора. Температурный коэффициент сопротивления меди ($\alpha_t = 0{,}0039$) может вызвать в диапазоне рабочих температур машины изменение сопротивления обмоток, измеряемое десятками процентов. Для компенсации изменения сопротивления используются уравнения, не содержащие в явном виде сопротивления [4]. Однако следует иметь в виду, что применяемые в этих уравнениях индуктивности ($L = \Psi/i$) также не постоянны, а являются лишь отражением условий существования магнитного поля [5].

Если учесть изменение параметров, входящих в уравнения, используемых при вычислениях потокосцеплений, то частотно-регулируемые электроприводы с косвенным и прямым способами определения составляющих вектора главного потокосцепления будут вполне конкурентоспособными. Кроме того, с учетом такого критерия, как надежная работа при воздействии возмущающих факторов (одиночные удары, вибрации), который является существенным фактором при синтезе автоматизированных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности, косвенный способ можно считать более предпочтительным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.В.* Идентификация электромагнитных переменных в машинах переменного тока / В.В.Алексеев, В.А.Дартау // Высокомоментные синхронные двигатели: теория, расчет, управление. НЭТИ. Новосибирск, 1989.

2. *Алексеев В.В.* Сравнительные характеристики систем управления электроприводов для буровых установок / В.В.Алексеев, В.И.Вершинин // Электрофорум. 2003. № 6.

3. *Рудаков В.В.* Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В.Рудаков, И.М.Столяров, В.А.Дартау. Л., 1987.

4. *Козярук А.Е.* Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А.Е.Козярук, В.В.Рудаков. СПЭК. СПб., 2004.

5. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М., 1994.

REFERENCES

1. *Alekseev V V., Dartau V.A.* Identification of electromagnetic variables in machines of an alternating current. Synchronous engines with the high moment // The theory calculation, management. NETI. Novosibirsk, 1989.

2. *Alekseev V V., Vershinin V.I.* Comparative characteristics of control systems of electric drives for chisel installations // Electroforum. 2003. N 6.

3. *Rudakov V V , Stolyarov I.M., Dartau V A.* Asynchronous electric drives with vector management. Leningrad, 1987.

4. *Kozyaruk A.E., Rudakov V.V.* Modern and perspective algorithmic maintenance is frequency – adjustable electric drives. Saint Petersburg, 2004.

5. *Kopylov I.P.* Mathematical modelling of electric machines. Moscow, 1994.