

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ, ВОЗБУЖДЕНИЕМ И СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Введение. Современные электромеханические системы на основе машины двойного питания (МДП) находят все более широкое применение в промышленности и энергетике [1]. Это, в первую очередь, связано со следующими преимуществами таких систем [1]-[4]: низкие капитальные затраты, поскольку мощность преобразователя частоты в цепи ротора пропорциональна скольжению; возможность независимого регулирования момента (угловой скорости) и коэффициента мощности на стороне статора; при использовании МДП в качестве генератора возможно поддержание постоянной частоты выходного напряжения при изменяющейся скорости вращения ротора.

В общем случае запуск МДП в работу включает следующие этапы:

- разгон ротора МДП до синхронной скорости, который можно производить с помощью пускового устройства [1] или на основе способа, представленного в [5], а также с помощью первичного приводного двигателя в системах генерирования электроэнергии;
- синхронизацию вектора ЭДС статора с вектором напряжения питающей сети с целью «мягкого» включения статорных обмоток в сеть (без переходных режимов в идеальном случае);
- подключение статора МДП к сети;
- управление моментом и реактивной мощностью статора МДП.

В настоящей статье представлены алгоритмы векторного управления пуском, возбуждением и синхронизацией МДП, а также результаты их экспериментального тестирования.

Схема электропривода на основе МДП показана на рис. 1. На схеме обозначено: ДП – датчик положения (скорости) ротора, ДН – датчики напряжения, ДТ – датчики токов, Т – трансформатор, К1, К2 – контакторы.

Предложена следующая последовательность управления процессом ввода асинхронного двигателя в режим двойного питания, которая не требует дополнительных пусковых средств.

1. Посредством контактора К2 закорачивается статор.
2. В режиме частотного управления (со стороны роторной цепи) определяется угловое положение между магнитными осями статора и ротора.
3. В режиме глубокого ослабления поля с помощью алгоритма векторного управления машина разгоняется до скорости выше синхронной.
4. Токи ротора и статора регулируются в нуль.
5. Контакт К2 размыкается.
6. Выполняется возбуждение и синхронизация ЭДС статора с напряжением сети.
7. Контакт К1 замыкается и подключает статор МДП на сеть.
8. Активируется алгоритм регулирования координат МДП.

Для реализации режимов разгона, возбуждения и синхронизации разработаны следующие алгоритмы управления.

Алгоритм векторного управления пуском включает [5]:

- регулятор потока

$$\begin{aligned} \dot{i}_{2q}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \\ \dot{\epsilon}_0 &= \omega_0 = -\alpha L_m \frac{\dot{i}_{2d}^*}{\psi^*}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\psi^*, \dot{\psi}^*$ – заданная траектории потока и ее первая производная, i_{2d}^*, i_{2q}^* – заданные значения компонент вектора тока ротора, ϵ_0 – угловое положение синхронной системы координат (d-q) относительно стационарной системы координат (a-b), $\alpha = R_1/L_1$, R_1 –

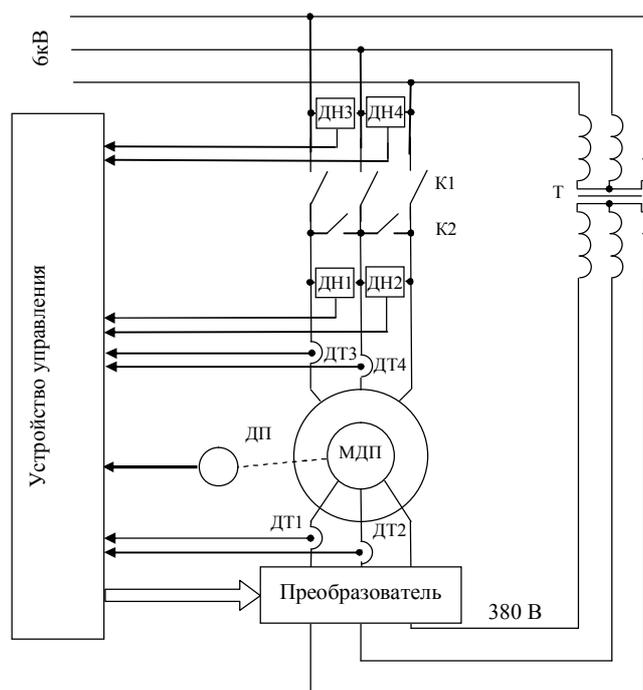


Рис. 1.

активное сопротивление статора, L_1 – индуктивность статора, L_m – индуктивность намагничивающего контура;

– регуляторы токов ротора

$$\begin{aligned} u_{2d} &= \sigma \left(\gamma i_{2d}^* - \omega_2 i_{2q} + \beta \omega \psi^* - (k_i + \lambda \omega^2) \tilde{i}_{2d} - z_d + i_{2d}^* \right), \\ u_{2q} &= \sigma \left(\gamma i_{2q}^* + \omega_2 i_{2d} - \alpha \beta \omega \psi^* - (k_i + \lambda \omega^2) \tilde{i}_{2q} - z_q + i_{2q}^* \right), \\ \dot{z}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{2d}, \\ \dot{z}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{2q}, \end{aligned} \quad (2)$$

где u_{2d}, u_{2q} – компоненты вектора напряжения ротора, i_{2d}, i_{2q} – компоненты вектора тока ротора, ω – угловая

скорость ротора $\tilde{i}_{2d} = i_{2d} - i_{2d}^*$, $\tilde{i}_{2q} = i_{2q} - i_{2q}^*$, $\omega_2 = \omega_0 - \omega$, $\sigma = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right)$, $\beta = \frac{L_m}{L_1 \sigma}$, $\gamma = \left(\frac{R_2}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right)$, L_2

– индуктивность ротора, $(k_i + \lambda \omega^2) > 0$ и $k_{ii} > 0$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регуляторов тока, $\lambda \geq 0$ – настроечный параметр, без потери общности здесь и далее принята одна пара полюсов;

– динамический регулятор скорости

$$\begin{aligned} i_{2d}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} (\hat{M}_c + \dot{\omega}^* + \xi), \\ \dot{\xi} &= -\frac{1}{\tau} \xi - \frac{k_{\omega}}{\tau} \dot{\omega}, \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega} \dot{\omega}, \end{aligned} \quad (3)$$

где \hat{M}_c является оценкой константы M_c / J , M_c – момент нагрузки, J – момент инерции, $\mu = (3L_m / 2JL_1)$, $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости, τ – постоянная времени фильтра скорости.

Алгоритм синхронизации и возбуждения МДП. Для синтеза алгоритма управления в этом режиме рассмотрим модель двигателя с разомкнутым статором, представленную в синхронной системе координат (d-q), ориентированной по вектору напряжения сети.

$$\begin{aligned} E_d &= L_m \dot{i}_{2d} - \omega_1 L_m i_{2q}, \\ E_q &= L_m \dot{i}_{2q} + \omega_1 L_m i_{2d}, \\ \dot{i}_{2d} &= -\gamma i_{2d} + (\omega_1 - \omega) i_{2q} + L_2^{-1} u_{2d}, \\ \dot{i}_{2q} &= -\gamma i_{2q} - (\omega_1 - \omega) i_{2d} + L_2^{-1} u_{2q}, \end{aligned} \quad (4)$$

где E_d, E_q – компоненты вектора ЭДС статора, ω_1 – угловая скорость вращения вектора напряжения сети.

Поскольку вектор напряжения сети совпадает с осью d синхронной системы координат (d-q), то для обеспечения равенства векторов напряжения статора и сети сформируем задания для компонент вектора ЭДС в виде:

$$\begin{aligned} E_d^* &= U_m, \\ E_q^* &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где U_m – модуль вектора напряжения сети.

Определив ошибки регулирования вектора ЭДС в виде

$$\begin{aligned} \tilde{E}_d &= E_d - E_d^*, \\ \tilde{E}_q &= E_q, \end{aligned} \quad (6)$$

представим условия достижения синхронизации следующим образом:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{E}_d, \tilde{E}_q) = 0. \quad (7)$$

Для достижения цели управления (7) синтезируем алгоритм векторного управления возбуждением и синхронизацией в виде:

$$\begin{aligned} i_{2d}^* &= 0, \\ i_{2q}^* &= -U_m / \omega_1 L_m, \\ u_{2d} &= L_2 \left(\gamma i_{2d}^* - (\omega_1 - \omega) i_{2q} - k_i \tilde{i}_{2d} - x_d + i_{2d}^* \right), \\ u_{2q} &= L_2 \left(\gamma i_{2q}^* + (\omega_1 - \omega) i_{2d} - k_i \tilde{i}_{2q} - x_q + i_{2q}^* \right), \end{aligned} \quad (8)$$

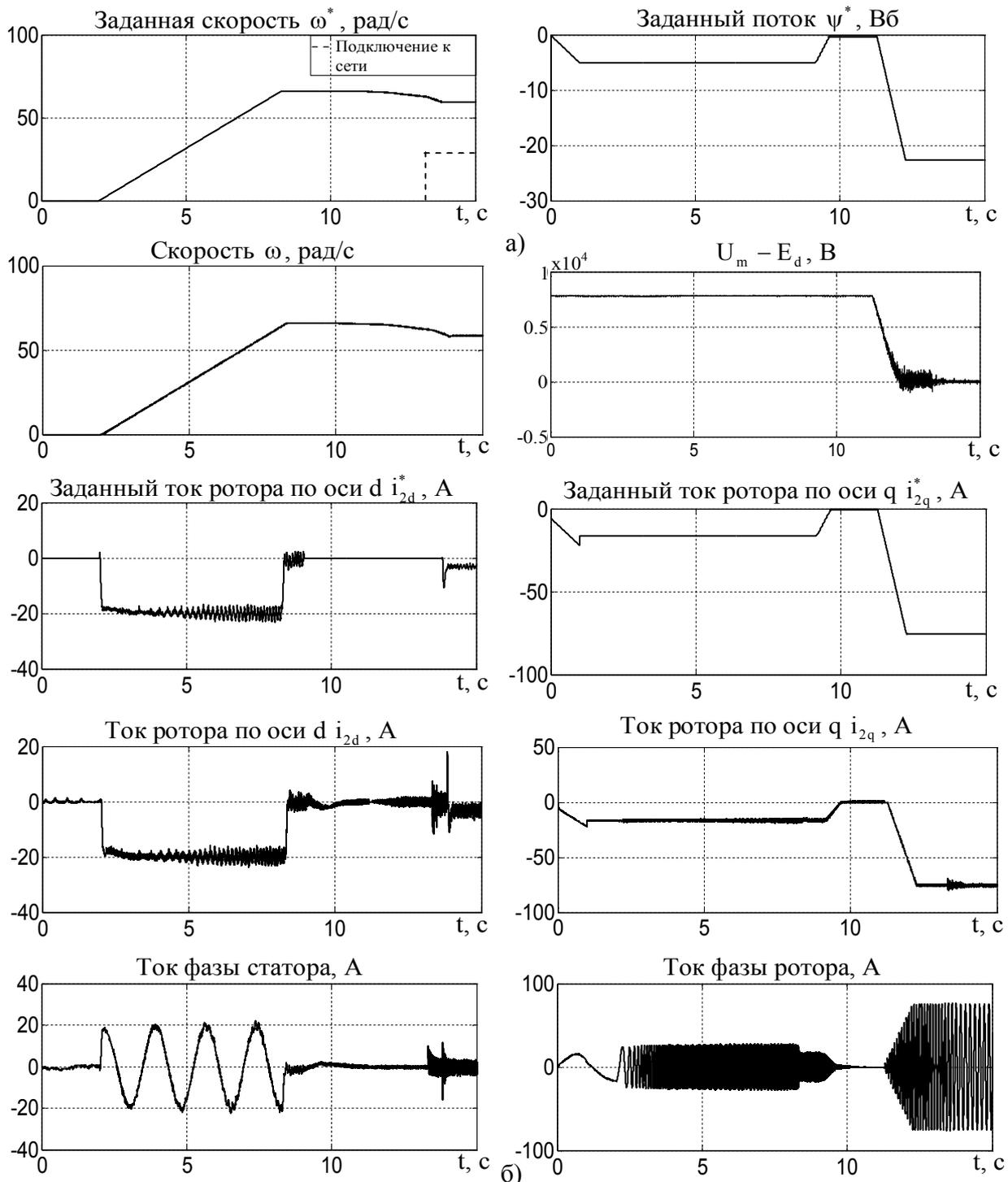


Рис. 2.



Рис. 3.

$$\begin{aligned}\dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{2d}, \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_{2q}.\end{aligned}\quad (9)$$

Подставив (8), (9) в (4), получим уравнения динамики ошибок отработки ЭДС

$$\dot{\tilde{E}}_d = L_m \dot{\tilde{i}}_{2d} - \omega_1 L_m \tilde{i}_{2q}, \quad (10)$$

$$\dot{\tilde{E}}_q = L_m \dot{\tilde{i}}_{2q} + \omega_1 L_m \tilde{i}_{2d},$$

$$\dot{\tilde{i}}_{2d} = -(k_i + \gamma) \tilde{i}_{2d} - x_d,$$

$$\dot{\tilde{i}}_{2q} = -(k_i + \gamma) \tilde{i}_{2q} - x_q, \quad (11)$$

$$\dot{x}_d = k_{ii} \tilde{i}_{2d},$$

$$\dot{x}_q = k_{ii} \tilde{i}_{2q}.$$

Система дифференциальных уравнений (11) является линейной и асимптотически устойчивой при всех $k_i, k_{ii} > 0$. Следовательно, из условия

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}, x_d, x_q) = 0 \quad (12)$$

получим

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{E}_d, \tilde{E}_q) = 0. \quad (13)$$

Таким образом, цель управления (7) при синхронизации МДП достигается глобально.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальное тестирование выполнялось на установке с МДП РАД 750. Параметры машины РАД-750 следующие: номинальная мощность 630 кВт, напряжение статора 6 кВ, номинальный ток статора 50 А, номинальный ток ротора 540 А, $R_1 = 0.851$ Ом, $R_2 = 0.831$ Ом, $L_1 = 0.3338$ Гн, $L_2 = 0.3432$ Гн, $L_m = 0.3038$ Гн, коэффициент трансформации $k_T = 9.5$, число пар полюсов $p_n = 6$. Алгоритмы пуска (1) – (3) и синхронизации (8), (9) реализованы на 16-разрядном цифровом сигнальном процессоре TMS320LF2406A. При тестировании использовались следующие настройки алгоритма управления: $k_i = (k_i + \lambda \omega^2) = 500$, $\lambda = 0$, $k_{ii} = 30000$, $k_\omega = 30$, $k_{\omega i} = 0$, $\tau = 0.01$ с. После нахождения угла между магнитными осями статора и ротора использовалась следующая последовательность управления.

1. На начальном интервале времени двигатель возбуждается с использованием заданной линейно-изменяющейся траектории магнитного потока, начиная с $-0,04$ Вб и достигая установившегося значения $-5,04$ Вб (33% номинального) с первой производной, равной -5 Вб/с. Ненагруженный двигатель в режиме ослабления поля обрабатывает заданную траекторию скорости, начиная с нулевого значения и достигая 66 рад/с (125 % синхронной) с первой производной, равной 10 рад/с².

2. После разгона производится размыкание статорных обмоток и ввод МДП в режим синхронизации. Процесс возбуждения машины начинается с момента времени $t = 11.75$ с с использованием траектории заданного потока с первой производной, равной -22 Вб/с. В момент времени $t = 13.5$ с статор МДП подключается к сети, а при $t = 14$ с происходит активация алгоритма регулирования скорости МДП.

На рис. 2а представлены графики заданных траекторий угловой скорости и потокосцепления, а также сигнал, дающий команду на включение статора в сеть. Графики переходных процессов, показанные на рис. 2б и рис. 3, демонстрируют динамическое поведение системы в процессе ввода асинхронной машины в режим двойного питания. Из них следует, что разработанные алгоритмы векторного управления МДП обеспечивают плавный пуск и "мягкое" включение статора в сеть.

Выводы. Представлены алгоритмы векторного управления пуском, возбуждением и синхронизацией машины двойного питания, обеспечивающие разгон асинхронного двигателя при питании со стороны ротора, "мягкое" подключение статора к сети для ввода асинхронной машины в режим двойного питания без использования дополнительных пусковых устройств.

Литература.

- [1] W. Leonhard. Control of Electric Drives. –Springer-Verlag, Berlin, 1995.
- [2] Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Robust active-reactive control of a doubly-fed induction machine // in Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON'98. –Aachen, Germany. –Sept. 1998. –P. 1621–1625.
- [3] Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. Indirect stator flux-oriented output feedback control of the doubly fed induction machine // IEEE Trans. on Control Systems Technology. – November 2003. –Vol. 11, No. 6. –P. 875–888.
- [4] Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power control of a doubly-fed induction machine via output feedback // Control Engineering Practice. –2004. –Vol. 12, No. 1. –P. 41–57.
- [5] Пересада С. М., Болотников А. Ю., Ковбаса С. Н. Основанный на принципе пассивности алгоритм векторного управления асинхронным двигателем при питании со стороны ротора // Техн. электродинамика. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". –2006. –С. 83–88.