

Рис. 2. Функциональная схема систему управления СДПМ

Для управления отдельно полем и моментами рассмотрим полеориентированное управление.

Функциональная схема прямого управления с пространственно-векторной модуляцией безредукторным синхронным приводом представлена на рис. 3, где приняты следующие обозначения РТ, РП, РС – регуляторы тока положения и скорости соответственно; ДП – датчик положения; БФС – блок формирования сигнала; ШИМ – широтно-импульсный модулятор.

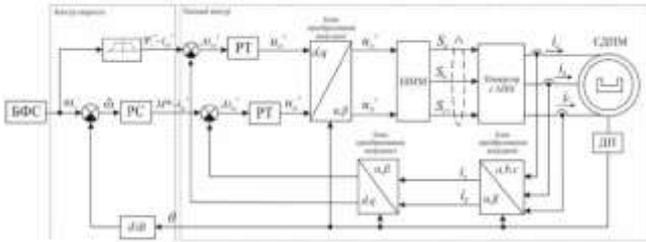


Рис. 3. Функциональная схема прямого управления СДПМ

Векторная диаграмма для полеориентированного управления показана на рис. 4.

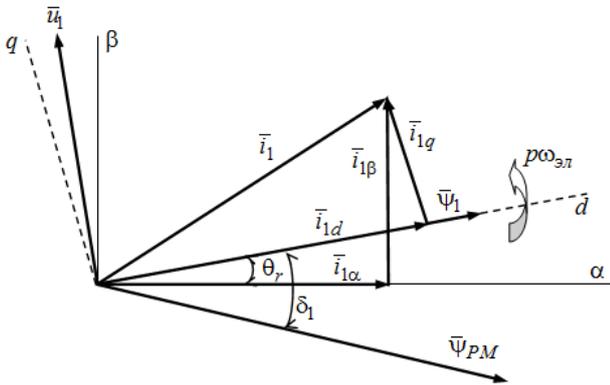


Рис. 4. Векторная диаграмма полеориентированного управления

В соответствии с векторной диаграммой (рис. 4) запишем уравнения напряжения СДПМ в системе координат  $d$ - $q$  относительно ротора как [1]:

$$\bar{u}_{1d} = R_1 \bar{i}_{1d} - \frac{d\bar{\psi}_{1d}}{dt} = R_1 \bar{i}_{1d} + L_{1d} \frac{d\bar{i}_{1d}}{dt} - \omega_{0el} L_{1d} \bar{i}_{1d},$$

$$\bar{u}_{1q} = R_1 \bar{i}_{1q} - \frac{d\bar{\psi}_{1q}}{dt} = R_1 \bar{i}_{1q} + L_{1d} \frac{d\bar{i}_{1d}}{dt} + \omega_{0el} L_{1q} \bar{i}_{1d} + \omega_{0el} \bar{\psi}_{PM},$$

где  $u_{1d}, u_{1q}, i_{1d}, i_{1q}, L_{1d}, L_{1q}$  – напряжения, токи, индуктивности на обмотке статора по осям  $d$ - $q$  соответственно;  $R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;  $\omega_{0el}$  – угловая скорость вращающегося магнитного поля;  $\bar{\psi}_{PM} = L_{md} \bar{i}_{PM}$  – потокосцепление рассеивания на постоянных магнитах;  $\bar{\psi}_{1d} = L_{1d} \bar{i}_{1d} + L_{md} \bar{i}_{1d} + \bar{\psi}_{PM}$ ,  $\bar{\psi}_{1q} = L_{1q} \bar{i}_{1q} + L_{mq} \bar{i}_{1q}$  – потокосцепления рассеивания на обмотке статора по осям  $d$ - $q$ ;  $L_{md}, L_{mq}$  – постоянные взаимные индуктивности.

Преобразование координат  $abc$ - $\alpha\beta$  можно записать как:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}.$$

Тогда уравнения прямого преобразования для напряжений неподвижных систем координат ротора  $d$ - $q$  к статора  $\alpha$ - $\beta$  примет вид:

$$u_\alpha = u_{1d} \cos \theta_r - u_{1q} \sin \theta_r,$$

$$u_\beta = u_{1d} \sin \theta_r + u_{1q} \cos \theta_r.$$

Уравнение для моментом СПДМ можно записать как:

$$M_{эм} - M_c = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_{эм}, M_c$  – электромагнитный и статический моменты электродвигателя;  $J$  – момент инерции двигателя.

Уравнение для электромагнитного момента СДПМ запишем как:

$$M_{эм} = \frac{3}{2} p_n (\bar{\psi}_{PM} \bar{i}_{1d} + (L_{1d} + L_{1q}) \bar{i}_{1d} \bar{i}_{1q}) + M_3,$$

где  $M_3$  – момент, возникающий на зубце.

На основании математической модели двигателя составим структурную схему (рис. 5).

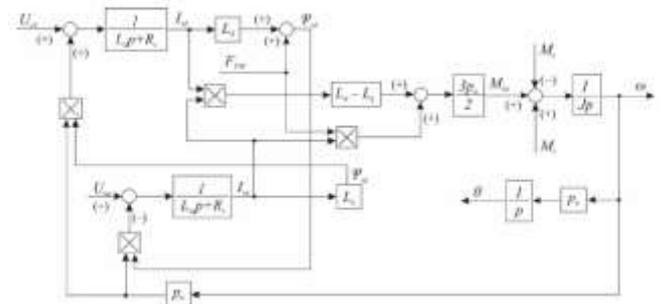


Рис. 5. Структурная схема СДПМ

Передаточные функции контуров тока по осям  $d$ - $q$  можно записать как:

$$W_{id}(s) = \frac{1}{L_{1d}s + R_1},$$

$$W_{iq}(s) = \frac{1}{L_{1q}s + R_1}.$$

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для моделирования системы управления электроприводом в сеточной части используем технические параметры, приведенные в табл. 1.

ТАБЛИЦА I ТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Параметр	Значение
Скорости, м/мин:	
- балансировочная	1400
- расчетная	1300
- вспомогательная	15-30
диапазон рабочей скорости, м/мин	600-1300
Активное сопротивление статора, Ом	2,1
Момент инерции двигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,012
Постоянная времени инвертора, с	0,0005

Для расчета параметров контура тока приведем структурную схему (рис. 6), где приняты следующие обозначения  $W_{PTq}(s)$  – передаточная функция регулятора тока по оси  $q$ ;  $k_{инв}$ ,  $T_{инв}$  – коэффициент усиления и постоянная времени инвертора соответственно.

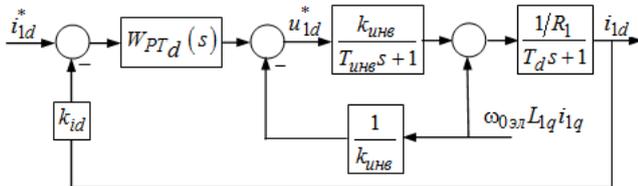


Рис. 6. Структурная схема контура тока

Передаточную функцию для регулятора тока по оси  $d$  можно записать как:

$$W_{PTd}(s) = \frac{(4T_{\mu}s + 1)(T_{1d}s + 1)}{8k_{инв}(1/R_1)k_{ид}T_{\mu}s},$$

где  $T_{\mu} = T_{инв} = 0,0005$  с – постоянная времени контура тока;  $T_{1d} = \frac{L_{1d}}{R_1}$  – электромагнитная постоянная времени статора по оси  $d$ .

Передаточная функция замкнутого контура тока примет вид:

$$W_{PT}(s) = \frac{1/k_{ид}}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu}s + 1}.$$

Структурная схема контура скорости представлена на рис. 7.

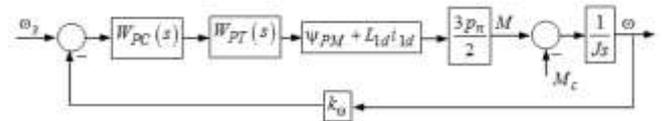


Рис. 7. Структурная схема контура скорости

Передаточная функция регулятора скорости можно записать как:

$$W_{PC}(s) = \frac{k_{iq}Js}{6k_{\omega}p_n W_{PM}(s)} + \frac{k_{iq}J}{6T_{\mu}k_{\omega}p_n W_{PM}(s)} + \frac{k_{iq}J}{12T_{\mu}^2 k_{\omega}p_n W_{PM}(s)s},$$

где  $W_{PM}(s) = \frac{1}{J_{np}s} = \frac{1}{1808s}$ ,  $J_{np}$  – приведенный момент инерции.

В результате моделирования структурной схемы (рис. 7) получен график переходного процесса скорости двигателя (рис. 8).

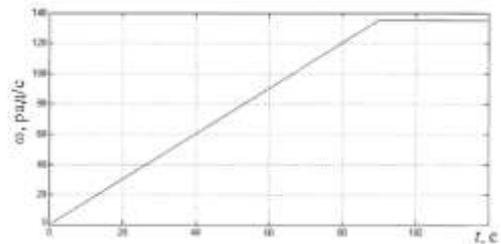


Рис. 8. График переходного процесса скорости двигателя

Двигатели сеточных валков обычно не перегружаются, так как они имеют ограниченную тяговую способность.

В работе рассматривается схема распределения нагрузок с помощью Droop функции (рис. 9), где  $k_{pn}$ ,  $k$  – коэффициенты распределения нагрузки и Droop функции соответственно [2].

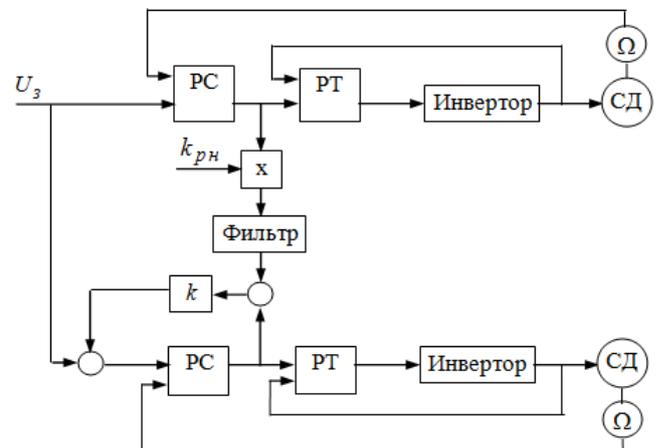


Рис. 9. Схема распределения нагрузок с помощью Droop функции

Моделирование системы распределения нагрузки выполнено в Matlab Simulink, результаты которого приведены на рис. 10 (моменты двигателей), рис. 11 (токи двигателей).

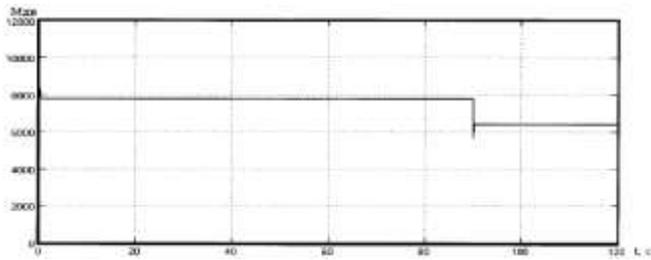


Рис. 10. График моментов двигателей

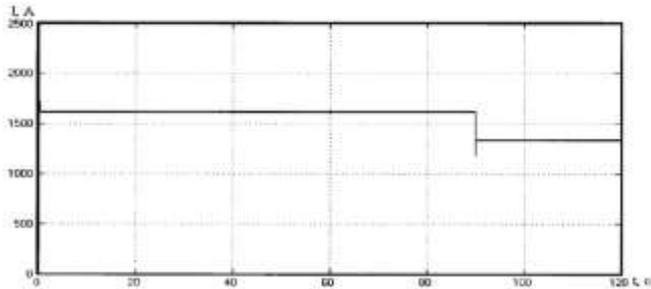


Рис. 11. Графики токов двигателей

Результаты моделирования показали, что при использовании схемы распределения нагрузки с использованием Drop функции соответствует требованиям технологического процесса.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение синхронных двигателей с постоянными магнитами в сеточной части позволило понизить энергопотребление, упростить схему синхронизации скоростей. Система распределения нагрузки приводов сеточной части поддерживает соотношение нагрузок приводов нижней и верхней сеток в соответствии с заданными требованиями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Juha Pyrhönen, Valéria Hrabovcová, Scott R Semken. Chapter 9 in Electrical Machine Drives Control: An Introduction. – John Wiley & Sons Ltd, 2016. pp. 296-345. DOI:10.1002/9781119260479.ch9
- [2] Kozlova Liudmila P., Nochevkina Yana A., Kozlova Olga A. Using the Drop Function in Technical Systems // Proceedings of 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), pp. 907-908 DOI: 10.1109/EIconRus.2017.7910702