

УДК 621.316

## **УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ БЕЗРЕДУКТОРНОГО МОТОР-БАРАБАНА ЛЕНТОЧ- НОГО КОНВЕЙЕРА**

И.Ю. Семыкина, д.т.н., доцент (КузГТУ)

А.В. Тарнецкая, аспирант (КузГТУ)

г. Кемерово

### **Аннотация**

В последние десятилетия у производителей прослеживается тенденция облегчения редукторов и проектирование безредукторных электроприводов для тяговых и приводных механизмов. Отказ от редуктора и замена асинхронных машин энергоэффективными синхронными двигателями с постоянными магнитами (СДПМ) позволяют повысить надежность электропривода, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт, увеличить эффективность технологического процесса.

Данная статья посвящена вопросам управления тихоходным высокомоментным СДПМ для безредукторного мотор-барабана ленточного конвейера. Моделирование СДПМ специальной конструкции производилось исходя из параметров реального приводного барабана шахтного ленточного конвейера, с учетом особенностей конструкции высокомоментных машин в среде MotorSolve с помощью метода конечных элементов. В статье представлено сравнение скалярного и векторного методов управления СДПМ и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** безредукторный электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, высокомоментные двигатели, ленточный конвейер.

### **Введение**

Ленточные конвейеры — основной вид транспорта для доставки угольной руды в туннеле шахты. В настоящее время в угольных шахтах России наибольшую часть конвейерных электроприводов составляют нерегулируемые асинхронные электроприводы с гидравлическими муфтами и редукторами с червячной и зубчатой передачами.

В традиционном асинхронном редукторном электроприводе возникают перенапряжения при старте, высокие пусковые токи и моменты, приводящие к дополнительному натяжению и пробуксовке ленты; наблюдаются потери мощности при распределении нагрузки, регулировании скорости и в установившихся режимах работы. Механический редуктор не только ограничивает мощ-

ность вращения, снижает КПД машины, но и обладает значительными габаритами. Соединительные муфты быстро выходят из строя из-за усталостных повреждений [1].

В последние десятилетия при проектировании высокомощных электроприводов зарубежные исследователи отказываются от использования асинхронных машин в силу их несоответствия современным стандартам по энергоэффективности, отдавая предпочтение другим видам электрических машин. В качестве электродвигателей приводных барабанов ленточных конвейеров могут применяться высокомоментные синхронные машины с постоянными магнитами (СДПМ). Также наблюдается тенденция замены приводных станций ленточных конвейеров на мотор-барабаны и внедрения безредукторных электроприводов с прямой передачей вращающего момента на вал рабочего органа, из чего можно сделать вывод об актуальности представленного исследования [2-6].

Для разработки системы управления тихоходным СДПМ безредукторного мотор-барабана, необходимо решить следующие задачи:

1. Получить модель тихоходного высокомоментного СДПМ для безредукторного мотор-барабана, используя данные о размерах и параметрах реального приводного барабана шахтного ленточного конвейера;
2. Выбрать метод управления исходя из требований к управлению СДПМ и ленточным конвейером;
3. Провести моделирование системы управления тихоходным СДПМ.

### **1. Моделирование СДПМ с помощью метода конечных элементов**

Синхронный двигатель с постоянными магнитами располагается внутри корпуса приводного безредукторного мотор-барабана и должен вырабатывать требуемые выходную мощность и механический момент и умещаться в заданные габариты. Приводной барабан асинхронного электропривода главного ленточного конвейера шахты «Талдынска-Каргайская» (г. Новокузнецк) имеет следующие параметры: ширина барабана  $l = 1,2$  м, диаметр барабана  $d = 1$  м. Параметры АД КЗ:  $U_m = 6$  кВ,  $P = 680$  кВт, скорость вращения барабана  $n = 60$  об/мин, номинальный момент  $M_n = 110$  кН · м.

Характеристики многополюсных тихоходных СДПМ зависят не только от материала и расположения постоянных магнитов, но и от магнитного угла, глубины пазов и величины зубцовых выступов. Высокомоментные тихоходные СДПМ имеют ротор с радиальными поверхностными магнитами (магнитный поток распространяется в радиальном направлении) и полюсными наконечниками для равномерного распределения магнитного потока в воздушном зазоре и защиты полюсов от размагничивания [7-9]. Для создания высокого вращающего момента ротор машины должен быть тонким, количество пар полюсов  $p \leq 12$  [10].

Моделирование СДПМ осуществляется в программных продуктах *MotorSolve* и *Magnet* компании *Infolytica* с помощью метода конечных элементов (МКЭ). В основе метода конечных элементов лежит принцип

разбиения области решений дифференциальных и интегральных уравнений с частными производными на конечное количество элементов. Для каждого элемента выбирается вид аппроксимирующей функции, сложность которой зависит от требуемой точности вычислений.

Параметры полученной модели СДПМ представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Параметры тихоходного СДПМ 680 кВт

U, В	P <sub>H</sub> , Вт	R <sub>s</sub> , Ом	L <sub>d</sub> , Гн	L <sub>q</sub> , Гн	M <sub>H</sub> , ·м	Ψ <sub>PM</sub> , Вб	r <sub>n</sub>	J, кг·м	cosφ	η
6000	680	2,367	0,579	0,496	110330	52,49	12	0,025	0,72	93,8

Из картины распределения индукции электромагнитного поля  $B$  в магнитопроводах статора и ротора при номинальной нагрузке видно, что наибольшее количество линий  $B$  пронизывает зубцовые зоны статора, при этом, из-за большой коэрцитивной силы ПМ, материал зубцовых зон сильно намагничивается, что является причиной неравномерного магнитного потока в воздушном зазоре с пиками в районе зубцов и появления большого количества высших гармоник.

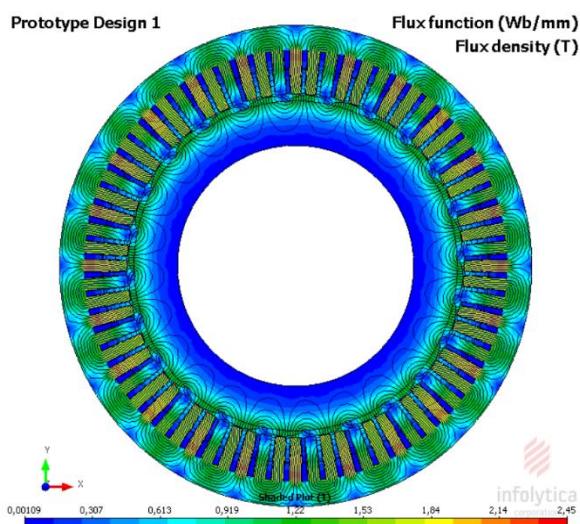


Рис. 1.1. Распределение электромагнитной индукции

нную форму распределения. Из-за неявнополюсности СДПМ реактивная мощность искажает угловую характеристику мощности, а дополнительный реактивный момент проявляется в виде 3-ей гармоники [11-13].

Как видно из графиков зависимостей токов, мощностей, потерь и момента от угла поворота ротора при номинальном токе статора (рис. 1.2-1.3), все характеристики статора, в особенности электромагнитный момент (рис. 1.3) имеют несинусоидальную форму распределения. Из-за неявнополюсности СДПМ реактивная мощность искажает угловую характеристику мощности, а дополнительный реактивный момент проявляется в виде 3-ей гармоники [11-13].

## 2. Выбор метода управления тихоходным СДПМ

Особенностью электропривода ленточных конвейеров являются высокий статический момент сопротивления и неравномерные динамические нагрузки, вызванные протяженностью и массой частей конвейера, застыванием смазки, защтыбовкой ленты и т.д. К электроприводу предъявляются высокие требования по

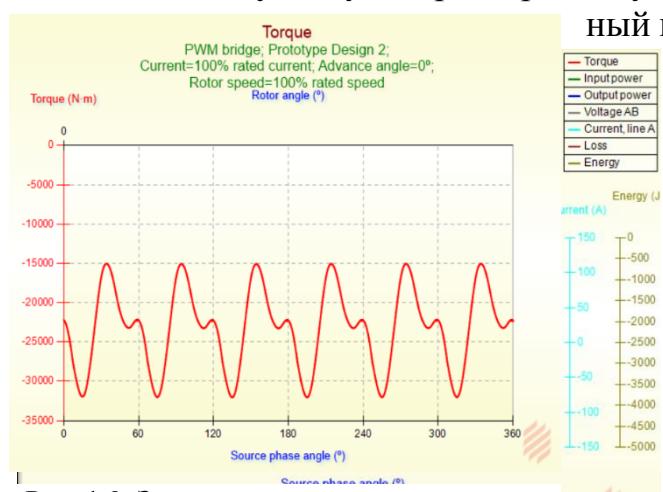


Рис. 1.3. Зависимость электромагнитного момента от положения ротора при номинальном токе статора

надежности, плавного пуска и плавного торможения. Регулирование скорости ленты производится в зависимости от режима работы конвейера и входного грузопотока [14].

Для качественного управления к СУЭП ленточного конвейера предъявляются следующие требования:

1. Широкий диапазон регулирования момента для управляемости при переменных динамических нагрузках;
2. Высокая точность регулирования для управления на низких и близких к нулю скоростях вращения;
3. Быстродействие управления для устойчивого управления при частых переходных процессах.

Для управления СДПМ необходимо знать угол отклонения ротора  $\theta$ . При бездатчиковом управлении используется косвенная оценка  $\theta$ , однако при работе на низких скоростях, реализация методов оценивания затруднена большим количеством обратных связей в системе СУ, а погрешность может быть значительной [15]. В датчиковом управлении для измерения  $\theta$  устанавливаются датчики Холла, резольверы или инкрементальные энкодеры, определяющие  $\theta$  с высокой точностью, поэтому для управления тихоходным СДПМ будут рассматриваться только датчиковые методы.

## 2.1. Моделирование системы управления тихоходным СДПМ

Математическая модель двухфазного СДПМ в осях  $d-q$ , на основе которой будет осуществляться управление, содержит следующие уравнения:

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s i_{sd} - \frac{d\psi_{sd}}{dt} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_{0el} L_{sq} I_{sq}, \\ U_{sq} &= R_s i_{sq} - \frac{d\psi_{sq}}{dt} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_{0el} L_{sd} I_{sd} + \omega_{0el} \psi_{PM}, \\ M_e &= \frac{3}{2} p_n [\psi_{PM} I_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) I_{sd} I_{sq}], \\ \omega_{0el} &= \frac{1}{J} (M_e - M_c). \end{aligned}$$

Скалярное управление основывается на пропорциональном изменении амплитуды и частоты питающего напряжения, отличается простотой и быстрым действием, но не подходит для управления тихоходным СДПМ, поскольку задействуются статические модели установившихся режимов работы и не учитывается динамика электропривода при регулировании.

При векторном управлении (ВУ) многофазные системы приводятся к двухфазному виду во вращающейся системе координат  $d-q$ . Одним из эффективных методов управления на низкой скорости является полеориентированное управление (ПОУ), при котором электромагнитный момент и потокосцепление статора контролируются косвенно посредством управления составляющими вектора тока статора [16-18]. Для подачи импульсов необходимой величины на

ключи инвертора используются ШИМ или пространственная векторная модуляция (ПВМ). В статье [19] проводится сравнительный анализ существующих СВУ для тихоходных СДПМ, наиболее подходящими из которых являются ПОУ-ШИМ, прямое управлением моментом с ПВМ, дифференциальное и адаптивное управление [20-23]. Однако в статье приводился теоретический анализ, при компьютерном моделировании лучшие результаты показала система с ПОУ-ШИМ, представленная ниже. Схема датчикового ВУ тихоходным СДПМ по принципу ПОУ с ШИМ-модуляцией и нулевым током статора по оси  $d$  показана на рис. 2.1.

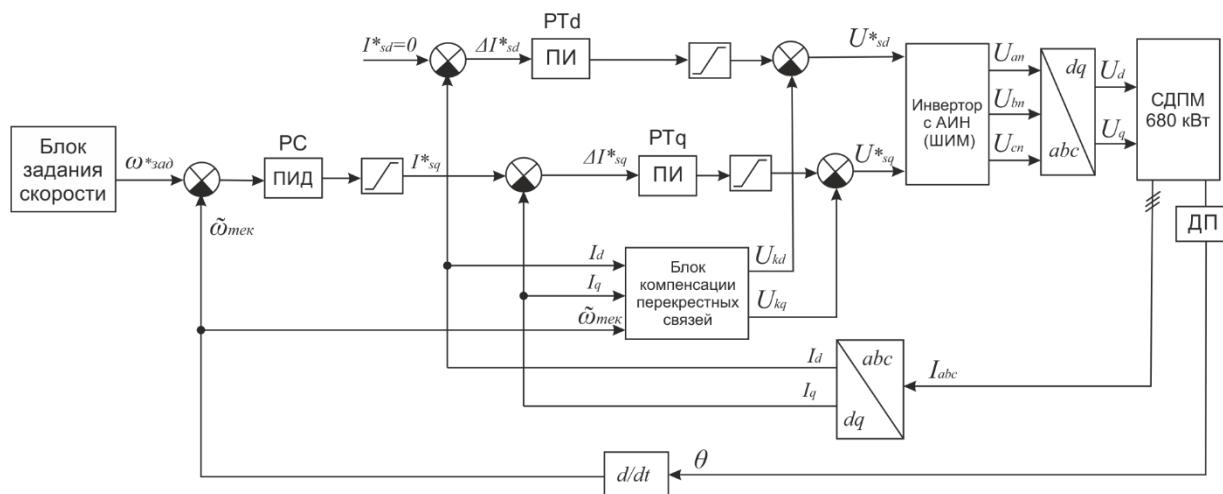


Рис. 2.1. Система векторного управления тихоходным СДПМ (ПОУ-ШИМ при  $I_d=0$ )

На рис. 2.2. представлены результаты моделирования плавного пуска для ПОУ-ШИМ.

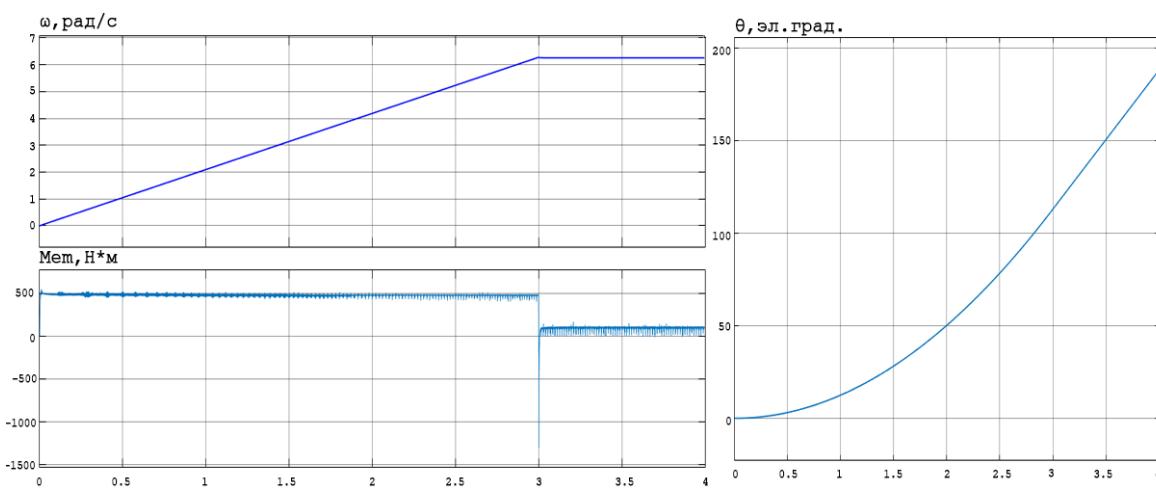


Рис. 2.2. Зависимости угловой скорости, электромагнитного момента и угла поворота ротора СДПМ при плавном пуске ( $t_p = 3$  с,  $M_c = 100$  Н·м) для ПОУ-ШИМ при  $I_d=0$

## Заключение

В данной статье рассмотрены вопросы управления высокомоментным тихоходным СДПМ, связанные с особенностями его конструкции и электромагнитным моментом, а также представлены результаты моделирования СДПМ 680 кВт для приводного мотор-барабана ленточного конвейера и плавного пуска для системы векторного управления ПОУ-ШИМ при  $I_d=0$ . Как видно из рис. 2.2, при разгоне тихоходного СДПМ наблюдаются незначительные пульсации момента, которые могут быть существенно возрасти при нагрузке на валу, поэтому СВУ необходимо усовершенствовать с помощью дополнительных регуляторов по скорости и моменту.

### **Список источников**

1. Rathmann Boris. Mining conveyor systems solution portfolio [Электронный ресурс]/ Boris Rathmann, HUB BU Process Industries Germany, Jornadas Técnicas// ABB – BU-Minerals, MTC Material Handling Germany. – 2015.
2. Alex Kanaris. The Energy Savings & Performance Gains between two Conveyor Drive Designs. Van der Graaf Drum-motors, 2016.
3. Willem Niemandt. Overland conveying. Reaching New Lengths/Willem Niemandt, Sandvik Mining. //World Coal. – 2015. – № 6.
4. Variable-speed drives for belt-conveyor systems. ABB Process Industries – Open Pit Mining & Materials Handling, Cottbus, Germany. – 11, 2000.
5. Lauhoff, H. Speed Control on Belt Conveyors - Does it Really save Energy. Bulk Solids Handling, 25 (2005), No. 6, 368-377.
6. Gordon Cross. Belt conveyors. Starting methods/Gordon Cross, P.Eng, PMP // Magna Engineering. – 2015. – № 3.
7. Lu Zhongshu, Zhang Aijun, Ma Lie and Li Siyang. Design of Line-Start Low Speed and High Torque PMSM for Gearless Drive System. Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International.
8. Зарицкая Е.И., Прыймак М.В., Олейников А.М. Оценка влияния конфигурации магнитной системы на характеристики тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами // EiE. 2012. №1. С.28-32
9. Daniel Martínez. Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with NonOverlapping Concentrated Windings. XR-EE-E2C, 2012.
10. Juha Pyrhönen. Permanent magnet synchronous machine. Electrical drives. Juha Pyrhönen, LUT, Department of Electrical Engineering. – 2015.
11. Hooshang Mirahki, Mehdi Moallem. Torque Calculation in Interior Permanent Magnet Synchronous Machine Using Improved Lumped Parameter Models// Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 39, 131–139, 2014.
12. Taichi Nakamura, Takafumi Koseki, Yasuaki Aoyama. A low-speed high-torque permanent magnet synchronous motor. Reducing cogging torque and eddy current loss.

13. Kubo, K., Watanabe, M., Kozawa, F., Kawasaki, K. Disturbance torque compensated speed observer for digital servo drives // 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 2, pp. 1182–1187, 1990.
14. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов/ М.П. Белов, А.Д. Новиков, Л.Н. Рассудов// Учебник для высших учебных заведений. — 3-е изд. — М.: Академия, 2007. — 576 с.
15. Тарнецкая А.В. Современные бездатчиковые методы оценивания положения неподвижного ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами / А.В. Тарнецкая, И. Ю. Семыкина// Вестник КузГТУ. 2017. №2 (120).
16. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008.– 298 с.
17. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика). Методическое пособие. – М.: ЭФО, 2013. – 63 с.
18. M-S Wang, Y-S Kung, H Nguyen Thi, C-M Chang. Superior low-speed control of a permanent magnet synchronous motor with digital encoder // Proc. IMechE Vol. 225 Part I: J. Systems and Control Engineering. – 2010.
19. Tarnetskaya A.V., Semykina I.Y. The control method selection for the slow-moving permanent magnet synchronous motor used in the belt conveyor electric drive for the underground mining// Integrated Innovative Development Of Zarafshan: Achievements, Problems, Prospects. Tashkent. – 2017. – pp.175-180.
20. Рефки Абд Эль Вхаб Амр. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами / Рефки Абд Эль Вхаб Амр? А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев // Известия ТПУ. 2011. №4.
21. Rahman M.F, Zhong L. Comparison of Torque Responses of the Interior Permanent Magnet Motor under PWM Current and Direct Torque Controls // IECON-99. -PE-20.
22. Enrique I. Carrillo Arroyo. Modeling and simulation of Permanent magnet synchronous motor drive system // University of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2006.
23. Ming-Shyan Wang, Ying-Shieh Kung, Nguyen Thi Hanh, ChiaMing Chang. Adaptive Low-speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motors.