

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИНХРОННЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**  
**PERSPECTIVES OF THE APPLICATION OF ENERGY-EFFICIENT  
SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS**

**Д. М. ИВАНОВ**  
**D. M. IVANOV**

*Учреждение образования «Международный государственный экологический институт  
имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ  
г. Минск, Республика Беларусь  
dmitrymivanov89@mail.ru*

*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

Рассмотрены вопросы перспективности применения энергоэффективных синхронных электрических машин с постоянными магнитами.

The issues of the perspectives of using energy-efficient synchronous electric machines with electromagnetic excitation are considered.

*Ключевые слова:* синхронный электродвигатель с постоянными магнитами, датчик положения ротора, полеориентированное управление, математическая модель.

*Keywords:* synchronous electric motor with permanent magnets, rotor position sensor, field-oriented control, mathematical model.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2024-2-203-207>

Энергетика играет важную роль в развитии глобальной экономической системы. Рост численности населения, а также повышение экономического благосостояния стран и их граждан увеличивают производство товаров и потребность в электроэнергии.

Сегодня на системы электропривода приходится около 80% от всей потребляемой промышленностью электроэнергии, поэтому применение энергоэффективных электрических машин является наиболее важной задачей, которая стоит перед разработчиками.

Следует отметить основные способы повышения энергоэффективности электродвигателя:

- Повышение точности механической обработки заготовок при производстве узлов электродвигателя;
- Повышение точности систем управления электроприводом за счёт внедрения в работу высокочувствительных измерительных преобразователей и микроконтроллеров;
- Управление электроприводом при помощи преобразователя частоты (ПЧ), который позволяет управлять скоростью вращения электродвигателя и улучшает его эффективность работы, что в свою очередь снижает затраты на электроэнергию, кроме того наличие ПЧ позволяет использовать энергоэффективные синхронные двигатели с постоянными магнитами.

Вопрос применения современного энергоэффективного частотно-регулируемого электропривода является весьма актуальным, ведь во многих отраслях производства и сельского хозяйства используются технологические машины, рабочие органы которых вращаются с частотой значительно отличающейся от частоты вращения приводного двигателя. Для преобразования частоты вращения применяют различные механические преобразователи (редукторы), кроме этого для облегчения пуска и предотвращения заклинивания используют различного рода муфты. Использование этих дополнительных узлов приводного механизма значительно увеличивает его габаритные размеры, а также ухудшает надежность соединений, кроме того возрастает металлоемкость, потери энергии, вибрации и шум. Диапазоны регулирования скорости являются ограниченными (ступенчатыми). Все эти недостатки не позволяют назвать такого рода электропривод энергоэффективным. На сегодняшний день с бурным развитием силовой полупроводниковой микропроцессорной техники для систем управления электроприводом эти недостатки возможно нивелировать за счет применения регулируемых синхронных двигателей с постоянными магнитами [1].

Синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ) является наиболее перспективной электрической машиной, благодаря своим высоким эксплуатационным и энергетическим показателям. У него наиболее простая конструкция, которая не имеет потерь на возбуждение благодаря отсутствию обмоток возбуждения на роторе. Вращение ротора осуществляется за счет взаимодействия магнитного поля обмотки статора и постоянных магнитов, размещенных на роторе. Благодаря такой конструкции синхронный двигатель обладает высокой

стабильностью, точностью регулирования в широком диапазоне скоростей и нагрузочных моментов. Эти качества выделяют его из ряда всех остальных машин и обеспечивают ему применение во всех сферах промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Также данного типа электродвигатели сегодня широко используются в системах автоматизации, приводах станков, прецизионных системах слежения и в других различных технологических процессах.

СДПМ стали альтернативой эталонным по управляемости двигателям постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). Существенное развитие СДПМ получили с появлением IGBT, MOSFET транзисторов. Данные технологии в совокупности с недорогими постоянными магнитами на основе NdFeV начали вытеснять ДПТ НВ [1].

В современной литературе бесколлекторные двигатели такого типа имеют различные названия, но наиболее распространенным сегодня является общий термин «вентильный электродвигатель». Вентильный электродвигателя представляет собой электромеханическую систему, состоящую из синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением или постоянными магнитами и датчика положения ротора. Управление таким двигателем осуществляется при помощи преобразователя частоты (ПЧ) (рисунок 1).

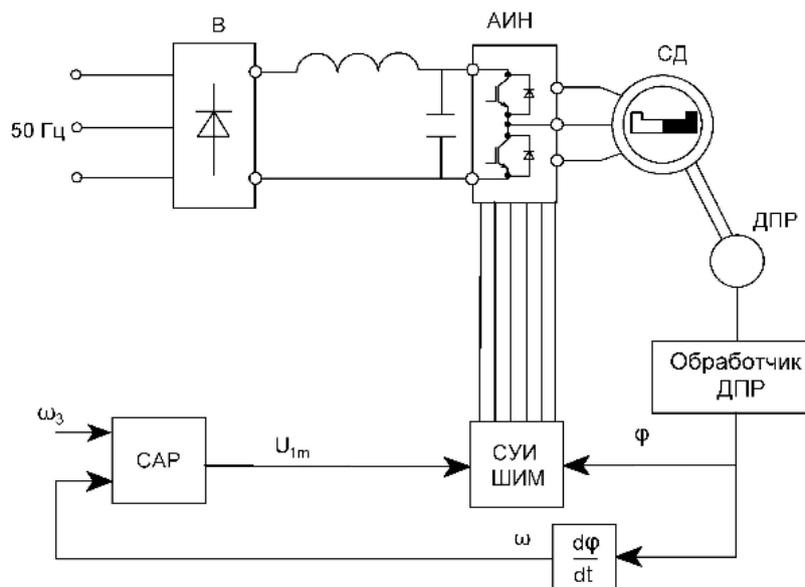


Рисунок 1 – Функциональная схема вентильного СДПМ

Одним из узлов в структуре управления СДПМ является датчик положения ротора (ДПР). Благодаря данному устройству формируются сигналы, которые используются в автономном инверторе напряжения (АИН) для управления транзисторами. За счет взаимодействия датчика положения ротора и ПЧ осуществляется протекание тока по обмоткам статора СДПМ таким образом, чтобы вектор магнитодвижущей силы (МДС) статора был направлен перпендикулярно вектору МДС ротора. Данные свойства схожи с ДПТ НВ. Величина напряжения, поступающая на статорную обмотку СДПМ, зависит от глубины модуляции ШИМ. Данный параметр будет зависеть от задающего сигнала напряжения  $U_{1m}$ , величина которого регулируется за счёт изменения задаваемой угловой скорости системой автоматического регулирования (САР) и реальной угловой скорости определяемой по углу положения ротора с ДПР.

Ротор СДПМ представляет собой электромагнит явнополюсного и неявнополюсного типа. Первое исполнение применяется для управления тихоходными технологическими машинами, а второй применяется в высокоскоростных установках за счет повышенной механической прочности. Неявнополюсные роторы имеют одинаковое значение индуктивности по продольным и поперечным осям  $L_d=L_q$  и имеют форму противо-ЭДС синусоидального типа, в свою очередь явнополюсные имеют разное значение индуктивности по осям  $L_d \neq L_q$  и трапецеидальной форму противо-ЭДС.

Ротор также классифицируют по способу расположения постоянных магнитов: с поверхностной установкой и встроенной. Более простой и бюджетный вариант установка постоянных магнитов на внешней поверхности ротора. В этом случае достигаются хорошие динамические характеристики электродвигателя при меньшей его стоимости. Второй же вариант со встроенными магнитами, данную технологию еще называют технология утопленных или скрытых магнитов, применяют для увеличения скорости и крутящего момента, кроме того такой вариант установки постоянных магнитов позволяет улучшить не только динамические характеристики, но и энергетические показатели.

Статор СДПМ конструктивно не отличается от других двигателей переменного тока, он бывает двух типов: с распределенной и с сосредоточенной обмоткой. В СДПМ в основном применяются распределенные обмотки, так как сосредоточенные не могут обеспечить близкого к синусоидальному закону изменения МДС в пространстве и электродвижущей силы (ЭДС) во времени. Двигатели с сосредоточенной обмоткой хорошо работают со

ступенчатым входным напряжением постоянного тока и их еще называют - бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ).

По способу управления применяются два основных вида управления синусоидальное для СДПМ и трапецеидальное для БДПТ.

Для решения более простых задач используют трапецеидальное управление за счет коммутации обмоток. Данный вид управления скалярный и является наиболее простым, он активно применяется в приводах, где не требуется точности в управлении и широкого диапазона регулирования. Существенно увеличить диапазон управления, точность регулирования, повысить быстродействие электропривода позволяет использование полеориентированного управления и прямого управления моментом. В системе прямого управления моментом СДПМ лежит метод управления моментом и потоком с помощью предельных циклов путем подачи с выхода ПЧ на обмотку СДПМ оптимального напряжения. Задача прямого управления моментом обеспечить быструю реакцию электромагнитного момента на управляющее воздействие. В полеориентированном управлении изменение момента осуществляется путем воздействия на ток статора, который является управляемой величиной, а в системе с прямым управлением моментом управляемой величиной является потокосцепление статора [2,3]. Полеориентированное управление реализуется за счет раздельного управления магнитным полем и моментом электродвигателя. Следует отметить, что данным методом управления применяется и для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКР) [4,5]. Обе системы применимы в современных приводах, однако необходимо обращать внимание на требования к показателям регулируемого электропривода, так как при малых скоростях в методе прямого управления моментом возникают пульсации тока и момента. При полеориентированном управлении управление СДПМ приближается к эталонному регулируемому ДПТ НВ и данная система управления потенциально является более энергоэффективной.

Покажем данные свойства СДПМ при помощи математической модели. Запишем уравнение математической модели эквивалентного двухфазного СДПМ в осях в d-q [6]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1q} &= i_{1q}R_1 + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + \omega_{\text{эл}}\Psi_{1d}; \\ M &= p_{\text{II}}\Psi_{1d}i_{1q}; i_{1d} = 0; \\ \Psi_{1d} &= L_{1d}i_{1d} + \Psi_{ma} = \Psi_{ma} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \Psi_{1m}; \\ \Psi_{1q} &= L_{1q}i_{1q} + L_{12}i_{2q} = L_{1q}i_{1q}; \\ e_1 &= \omega_{\text{эл}}\Psi_{1d}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $e_1$  – ЭДС вращения;

$R_1$  – активное сопротивление фазы.

Если постоянные магниты находятся на поверхности ротора, тогда можем принять:

$$L_{1d} = L_{1q} = L_1 = \text{const}$$

Добавив уравнение движения электропривода, получим математическую модель трехфазного СДПМ в осях d-q:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3} \cdot U_1 &= i_{1q}R_1 + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + \sqrt{3} \cdot \omega_{\text{эл}}\Psi_{1d}; \\ \Psi_{1q} &= L_1i_{1q}; \Psi_{1d} = \sqrt{3} \cdot \Psi_1; i_{1d} = 0; \\ M &= p_{\text{II}}\sqrt{3} \cdot \Psi_1i_{1q}; \Psi_1 = \Psi_{1\text{НОМ}} = \frac{E_{1\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}}; \\ E_{1Л} &= \sqrt{3} \cdot \Psi_1\omega_{\text{эл}}; \omega_{\text{эл}} = p_{\text{II}}\omega; \\ M - M_C &= J \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $U_1, E_1, \Psi_1$  – действующие значения фазного напряжения, ЭДС, потокосцепления трехфазного СДПМ:

$$U_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}; E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}}; \Psi_1 = \frac{\Psi_{1m}}{\sqrt{2}};$$

$E_{1Л}$  – действующее значение линейной ЭДС вращения;

$\omega_{\text{НОМ}}$  – номинальная угловая скорость двигателя;

$E_{1\text{НОМ}}, \Psi_{1\text{НОМ}}$  – действующие значения;

$M_C$  – статический момент;

$J$  – момент инерции.

Если математически описывать установившийся режим работы СДПМ тогда из уравнения (2) получим уравнение электрического равновесия:

$$\sqrt{3} \cdot U_1 = \sqrt{3} \cdot E_1 + I_{1q}R_1. \quad (3)$$

Данное выражение можно записать в другом виде:

$$U_{\mathcal{L}} = E_{\mathcal{L}} + I_{1q} R_1, \quad (4)$$

Из уравнения равновесия следует, что  $I_{1q} = I_1$  – это и есть действующее значение фазного тока трехфазного СДПМ, а линейные величины будут равны [7]:

$$U_{\mathcal{L}} = \sqrt{3} \cdot U_1, \quad E_{\mathcal{L}} = \sqrt{3} \cdot E_1. \quad (5)$$

Тогда в осях d-q установившийся режим работы трехфазного СДПМ будет описываться уравнениями через выражение фазных значений переменных при помощи действующих значений:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3} \cdot U_1 &= \sqrt{3} \cdot E_1 + I_1 R_1; \\ E_1 &= \omega_1 \cdot \Psi_1; \\ M &= p_{\Pi} I_1 \sqrt{3} \cdot \Psi_1; \quad \omega_1 = \omega_{\mathcal{ЭЛ}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Принимая во внимание уравнения (1), при этом учитывая (5) и (6), получим математическую модель трехфазного СДПМ в осях d-q [8]:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{3} \cdot U_1 &= i_1 R_1 + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} + \sqrt{3} \cdot \omega_1 \Psi_1; \\ M &= p_{\Pi} \sqrt{3} \cdot i_1 \Psi_1; \quad \Psi_{1q} = L_1 \cdot i_1; \\ M - M_C &= J \frac{d\omega}{dt}; \quad \Psi_{1d} = \sqrt{3} \cdot \Psi_1; \\ \omega_1 &= \omega_{\mathcal{ЭЛ}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В каталогах трехфазных СДПМ приводится значение постоянной величины, которая связывает электромагнитный момент с действующим током статора, а также действующее значение ЭДС с угловой скоростью двигателя. Запишем это выражение в математической форме:

$$p_{\Pi} \sqrt{3} \cdot \Psi_1 = p_{\Pi} \Psi_{1d} = \frac{M}{I_1} = \frac{E_{\mathcal{L}}}{\omega} = c \quad (8)$$

Запишем уравнение установившегося режима СДПМ с учетом постоянной величины с:

$$\left. \begin{aligned} U_{\mathcal{L}} &= E_{\mathcal{L}} + I_1 R_1; \\ E_{\mathcal{L}} &= c\omega; \\ M &= cI_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Если разделить первое уравнение из системы уравнений (9) на постоянную величину с и обозначить угловую скорость идеального холостого хода СДПМ следующим выражением:

$$\omega_0 = \frac{U_{\mathcal{L}}}{c} \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что  $\omega_0$  устанавливается за счет величины действующего значения первой гармоники линейного напряжения  $U_{\mathcal{L}}$  на выходе ПЧ.

При этом очевидно, что падение угловой скорости будет обусловлено изменением электромагнитного момента:

$$\Delta\omega = \frac{I_1 R_1}{c} = \frac{M R_1}{c^2} = \frac{M}{\beta} \quad (11)$$

Модуль жесткости механической характеристики будет иметь выражение:

$$\beta = \frac{c^2}{R} \quad (12)$$

Отсюда запишем уравнение механической характеристики трехфазного СДПМ в которой отсутствует продольная реакция якоря и регулирование скорости осуществляется с постоянным моментом:

$$\omega = \omega_0 - \frac{M}{\beta} \quad (13)$$

Как видно из полученных уравнений при векторном управлении имеем полную аналогию трехфазного СДПМ с ДПТ НВ при компенсации реакции якоря. Этот режим работы достигается за счет использования регулятора тока, который обеспечивает условие  $I_{1d} = 0$  и  $I_1 = I_{1q}$ , т. е. угол  $\theta_{\mathcal{ЭЛ}}$  между вектором тока  $I_1$  и осью q равен нулю.

Благодаря данным свойствам, которые реализуются при полеориентированном управлении, СДПМ под нагрузкой имеет абсолютно жёсткое семейство механических характеристик, не допускает скольжения ротора, а только угол отклонения от центра полюсного деления, как показано на рисунке 2.

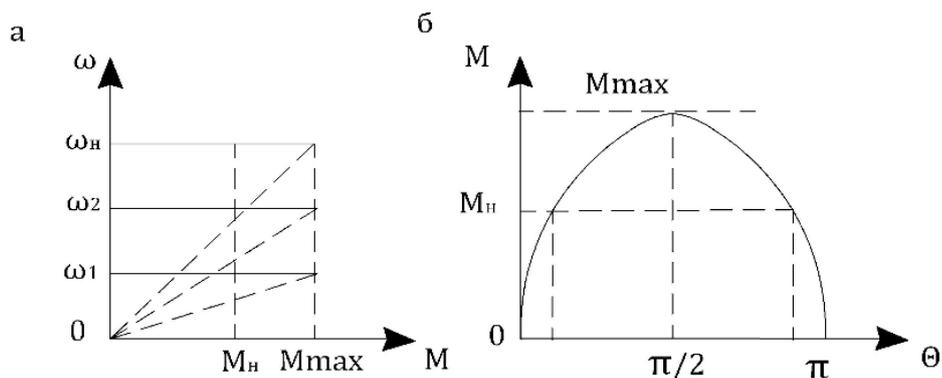


Рисунок 2 – Механическая (а) и угловая (б) характеристики СДПМ

Важным условием для достижения максимального КПД системы управления СДПМ и исключения опрокидывания ротора (рисунок 2, штриховые линии) управление должно быть реализовано с замкнутым контуром ПИ-регулятора по сигналу датчика положения ротора (ДПР) (рисунок 1).

Подводя итог, хочется отметить, что полученные математические выражения показывают полное сходство трехфазного СДПМ с эталонным по управляемости ДПТ НВ при компенсации реакции якоря. При управлении СДПМ его вектор тока перпендикулярен вектору магнитного потока, а в качестве индуктивности выступает только индуктивность рассеяния обмотки статора. Индуктивное сопротивление реакции якоря не оказывает влияния на электромагнитный момент и механическую характеристику, что значительно увеличивает диапазон регулирования, высокую точность и энергетическую эффективность систем управления с СДПМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, Д. М. Обоснование применения регулируемых синхронных электродвигателей с постоянными магнитами их классификация и математические модели / Д. М. Иванов // Эпоха науки. – 2023. – № 33. – С. 25-33. – EDN JJMPMK.
2. Абд Эль Вхаб Амр Рефки, Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Сравнительный анализ векторного управления и прямого управления моментом синхронного электродвигателя с постоянными магнитами // Известия ТПУ. Энергетика. – 2011. – Т. 319. – № 4. С. 93–99.
3. Абд Эль Вхаб Амр Рефки, Каракулов А.С., Дементьев Ю.Н., Кладиев С.Н. Микропроцессорная система прямого управления моментом электроприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. - № 6. – С. 62–67.
4. Иванов, Д. М. Независимый способ регулирования электромагнитного момента и потокосцепления асинхронного электродвигателя / Д. М. Иванов, С. С. Нефедов // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 65-летию агроэнергетического факультета и 100-летию И. Ф. Кудрявцева, Минск, 21-22 декабря 2022 г. - Минск: БГАТУ, 2023. - С. 66-68.
5. Иванов, Д. М. Векторное управление как наиболее прогрессивный метод управления потокосцеплением и электромагнитным моментом асинхронного двигателя / Д. М. Иванов, С. С. Нефедов // Энергосбережение - важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 19-20 декабря 2019 г. - Минск: БГАТУ, 2019. - С. 154-157.
6. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами: Учебное пособие / Фираго Б.И., Васильев Д.С. - Мн.:Вышэйшая школа, 2016. - 159 с
7. Фираго, Б.И. Теория электропривода: Учеб. пособие /Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. – 2-е изд.–Минск: Техноперспектива, 2007. – 587с.
8. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. Минск, 2006. – 363с.