

УДК 621.316

**ТЕХНОЛОГИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ  
В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СДПМ**

Аронов А.А., аспирант  
Научный руководитель А.В. ГРИГОРЬЕВ, к.т.н., доцент  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

В начале ХХI века наш мир стал свидетелем внушительного прогресса в области цифровых технологий, что привело к широкому распространению и использованию искусственного интеллекта (ИИ) в повседневной жизни. Этот период ознаменовался не только стремительным развитием технологии, но и их интеграцией в различные сферы человеческой деятельности.

Искусственный интеллект нашел свое применение в различных областях, начиная от бытового сектора, где применяются интеллектуальные чайники, системы управления умным домом, машины с искусственным интеллектом.

Однако применение искусственного интеллекта не ограничивается бытовыми аспектами жизни. Он активно внедряется в промышленность, где с каждым днем растет его значение. Крупные производственные предприятия внедряют системы искусственного интеллекта для управления производственными процессами, оптимизации логистики и повышения эффективности. Эти системы обеспечивают анализ данных в реальном времени, предсказывают потребности в ресурсах и помогают в принятии стратегических решений, что в конечном итоге способствует повышению производственной мощности и снижению издержек.

Одним из направлений искусственного интеллекта является машинное обучение.

Машинное обучение занимается созданием алгоритмов, закономерностей и моделей, которые позволяют компьютерным системам обучаться на основе полученных данных и прогнозировать те или иные события, все зависит от того в какой системе применяется.

Машинное обучение нашло свое применение в системе управления синхронного двигателя переменного тока с постоянными магнитами.

Если рассмотреть способы управления синхронным двигателем с постоянными магнитами без применения ИИ, то на сегодняшний день их разделяют на 2 группы:

- Скалярное управление;
- Векторное управление.

Скалярное управление синхронным двигателем постоянного тока (СДПМ) - это один из наиболее простых способов управления такими двигателями. Оно основано на применении фазового управления для регулирования скорости и питания двигателя. Однако, несмотря на свою простоту, скалярное управление имеет свои недостатки, особенно в условиях изменяющихся нагрузок на валу двигателя.

Принцип работы скалярного управления заключается в том, что частота и напряжение питания двигателя регулируются пропорционально требуемой скорости вращения. Это обеспечивает базовый уровень контроля над двигателем и позволяет поддерживать его работу в номинальных условиях.

Однако скалярное управление не учитывает динамические характеристики двигателя и не способно адаптироваться к изменениям нагрузки на валу двигателя. При возрастании нагрузки на двигатель может произойти потеря управления и выход из синхронного режима. Это происходит из-за того, что скалярное управление не обеспечивает обратной связи по параметрам двигателя и не способно динамически реагировать на изменения внешних условий [1-2].

Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами разделяется на:

- Полеориентированное управление;
- Прямое управление моментом.

Прямое управление моментом (Direct Torque Control, DTC) – это метод управления электроприводом, который обеспечивает быструю реакцию и высокую точность регулировки момента. В этой схеме используется непосредственное управление моментом и потоком в двигателе переменного тока, что позволяет достичь хороших динамических характеристик электропривода и широкий диапазон регулировки.

Однако, несмотря на ее преимущества, есть определенные ограничения в применении прямого управления моментом. В частности, значительная погрешность определения положения ротора и высокие пульсации тока статора и момента на валу могут снижать эффективность работы системы. Это означает, что точность контроля может страдать в условиях переменных нагрузок или при высоких требованиях к точности позиционирования.

Кроме того, прямое управление моментом создает высокую вычислительную нагрузку на систему управления. Для эффективной работы такой схемы требуется мощное процессорное устройство, способное обрабатывать большие объемы данных в реальном времени.

Полеориентированное управление бывает двух видов.

Полеориентированное управление с датчиком положения. Первая схема позволяет осуществлять плавное регулирование частоты вращения и момента на валу, а также задавать точное положение ротора. В качестве дат-

чиков применяются оптические, магнитные и магниторезистивные устройства, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы, индуктивные энкодеры и другие устройства. Такие схемы требуют наличия контроллеров и точной настройки. Их стоимость достаточно высока.

Полеориентированное управление синхронными машинами без использования обратной связи от датчика – это методика управления, где угол поворота ротора определяется на основе генерации противо-ЭДС электродвигателем во время вращения. Этот метод позволяет определить положение ротора относительно стационарной системы координат, что необходимо для правильного управления машиной.

Однако, такой подход имеет свои ограничения. Например, при низких скоростях вращения обратная ЭДС может быть слишком малой и не отличимой от уровня электромагнитных шумов. Кроме того, при неподвижном роторе вовсе не генерируется противо-ЭДС.

Эта схема управления позволяет изменять характеристики электропривода синхронных двигателей постоянного тока с явнополюсным ротором. Однако, при использовании синхронных машин другого типа, возможности регулировки могут быть сильно ограничены.

Для реализации этой схемы управления необходим процессорный блок, который обрабатывает данные о противо-ЭДС и определяет положение ротора в соответствии с требуемыми параметрами работы системы[3-4].

Самым оптимальным и экономически выгодным является полеориентированное бездатчиковое управление. Исследования в этой области привели к возможности применения искусственного интеллекта и разработки способа управления[5-12]. В 2003 было изучено что производительность искусственного интеллекта ограничена, в следствие длительных по времени вычислений, так как все они определены рекурсивными вычислениями[6].

Машинное обучение, как подраздел искусственного интеллекта, представляет из себя распределенную конструкцию, что позволяет обрабатывать несколько входных сигналов и выдавать несколько выходных сигналов. Также система может распознавать нелинейные системы, а также обучаться во время работы, адаптироваться и изменяться.

Все выше перечисленное позволяет применять машинное обучение в управлении синхронными двигателями с постоянными магнитами.

В статье [7] авторы применил контроллер нейронной сети, включающий самонастраивающийся пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор радиальной базисной функции, чтобы контролировать петлю скорости СДПМ.

В статью [8] авторы использовали метод обучения нейронной сети обратного распространения (BPNN) для отслеживания скорости бесщеточного двигателя постоянного тока (BLDC).

В статье [9] была использована реактивная модельная адаптивная система оценки скорости, основанная на реактивной мощности, а также адаптивная нейронная сеть для СДПМ, с целью создания бездатчиковой системы скорости.

Ранее искусственный интеллект применялся для прогнозирования местоположения ротора.

В своем исследовании Раджеш Кумар [10] успешно использовал искусственные нейронные сети для оценки угла положения ротора, принимая во внимание информацию о трапецеобразной обратной электродвижущей силе от BLDC в качестве входных данных.

В другом исследовании была успешно применена программная библиотека вычислительного программного обеспечения Scikit-learn вместе с двумя токами от преобразования Кларка ( $I_\alpha$  и  $I_\beta$ ) в качестве входных данных для упрощения моделирования положений ротора. Однако алгоритм AdaBoost и программные библиотеки Scikit-learn требуют значительных вычислительных ресурсов[11].

Кроме того, в статье [12] описан наблюдатель на основе машинного обучения, использующий алгоритм обратного распространения.

Бездатчиковые наблюдатели на основе машинного обучения представляют интерес, так как они используют данные из эффективно работающего управляющего процесса, вместо заранее заданных параметров двигателя, как это делает наблюдатель на основе скользящего режима.

В отличие от последнего, наблюдатели на машинном обучении не требуют подробных параметров, но модель машинного обучения должна быть обучена на хорошо функционирующих данных двигателя.

В работах [11,12] использовались обучающие данные, полученные при сэмплировании сигналов на различных точках управления скоростью двигателя. Эти методы давали хороший результат для постоянного контроля скорости, но возникали трудности при переходах скорости. Примененная многослойная прямая связь в этих исследованиях имела недостаток в отсутствии обратной связи данных от предыдущих позиций.

Данную проблему можно решить, если использовать предыдущие значение выходного сигнала для угла положения ротора.

Рассмотрев способ управления синхронным двигателем с постоянными магнитами можно сказать, что управление при помощи машинного обучения имеет более выгодные позиции. Если рассмотреть систему управления на ИИ, как встраиваемую систему, то можно сказать о привлекательности данного способа к применению, так как идет широкая модернизация производственных процессов и в скором времени мы можем увидеть серьезную интеграцию искусственного интеллекта на производственные объекты.

### Список литературы:

1. Шевченко, В. П. Синхронный двигатель при частотном регулировании / В. П. Шевченко, О. Б. Бабийчук // Электротехнические и компьютерные системы. 2014. Т. 90, № 14. С. 39–42.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М. : Издательский центр Академия, 2006. – 272 с.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: - ГОУВПО., 2008. - 298 с.
4. Фираго, Б. И. Векторные системы управления электроприводами / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. Минск: Вышэйш. шк., 2016. 159 с.
5. Putra, D.S.; Chen, S.-C.; Khong, H.-H.; Cheng, F. Design and Implementation of a Machine-Learning Observer for Sensorless PMSM Drive Control. *Appl. Sci.* 2022, 12, 2963.
6. Lachman, T.; Mohamad, T.R.; Teo, S.P. Sensorless position estimation of switched reluctance motors using artificial neural networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, Changsha, China, 8–13 October 2003; Volume 1, pp. 220–225.
7. Hoai, H.-K.; Chen, S.-C.; Than, H. Realization of the Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Control System with an Intelligent Controller. *Electronics* 2020, 9, 365.
8. Ramírez-Cárdenas, O.-D.; Trujillo-Romero, F. Sensorless Speed Tracking of a Brushless DC Motor Using a Neural Network. *Math. Comput. Appl.* 2020, 25, 57.
9. Sai Shiva, B.; Verma, V.; Khan, Y.A. Q-MRAS-Based Speed Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Adaptive Neural Network for Performance Enhancement at Low Speeds. In *Innovations in Soft Computing and Information Technology*; Chattopadhyay, J., Singh, R., Bhattacharjee, V., Eds.; Springer: Singapore, 2019; pp. 103–116.
10. Kumar, R.; Padmanaban, S.V. An Artificial Neural Network Based Rotor Position Estimation for Sensorless Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive. In *Proceedings of the IECON 2006—32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, France, 6–10 November 2006; IEEE: Paris, France, 2006; pp. 649–654.
11. Makni, Z.; Zine, W. Rotor position estimator based on machine learning. In *Proceedings of the IECON 2016—42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 23–26 October 2016; IEEE: Florence, Italy, 2016; pp. 6687–6692.
12. Zine, W.; Makni, Z.; Monmasson, E.; Idkhajine, L.; Condamin, B. Interests and Limits of Machine Learning-Based Neural Networks for Rotor Position Estimation in EV Traction Drives. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2018, 14, 1942–1951.

## Информация об авторах:

Аронов Александр Александрович, аспирант, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д.28, [aronov1@kuzstu.ru](mailto:aronov1@kuzstu.ru)

Григорьев Александр Васильевич, к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, [gav.eav@kuzstu.ru](mailto:gav.eav@kuzstu.ru)