гического вывода. Их применение позволяет существенно повысить качество регулирования за счет адаптации к нелинейностям, неопределенностям и изменяющимся условиям работы.

Литература

1. Ким, Д. П. Теория автоматического управления / Д. П Ким. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – Т. 1. Линейные системы. – 288 с.
2. Хайкии, С. Нейронные сети: полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Вильямс, 2016. – 1104 с. : ил.

## АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ, ПОВЫШАЮЩИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Чжан Чжунбинь**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика*

Научный руководитель В. А. Савельев

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь,*

*Проведен сравнительный анализ алгоритмов управления матричными преобразователями частоты, направленный на максимизацию энергоэффективности современных систем электропривода. Основное внимание уделено интеграции методов искусственного интеллекта и машинного обучения, включая искусственные нейронные сети и глубокое обучение с подкреплением, для решения проблемы вычислительной сложности классических методов. Приведены численные показатели эффективности (КПД, коэффициент гармоник, время выполнения), подтверждающие перспективность интеллектуальных систем управления.*

**Ключевые слова:** матричный преобразователь частоты, энергоэффективность, искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, обучение с подкреплением, электропривод.

В условиях глобального перехода к энергосберегающим технологиям и цифровизации промышленности оптимизация работы электропривода, потребляющего до 60 % всей вырабатываемой электроэнергии, становится первоочередной задачей. Традиционные двухзвенные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока имеют ряд недостатков: наличие громоздких электролитических конденсаторов, ограниченный срок службы и потери при двукратном преобразовании энергии.

Матричный преобразователь частоты (МПЧ) представляет собой одну из наиболее перспективных топологий в силовой электронике, обеспечивающую прямое преобразование переменного тока в переменный (*AC*/*AC*) без использования промежуточного звена постоянного тока. В отличие от традиционных двухзвенных преобразователей МПЧ реализует концепцию «полностью кремниевого преобразователя», что существенно повышает его удельную мощность и надежность. МПЧ позволяет достичь более высокой удельной мощности, надежности и КПД до 98 %. Однако сложность топологии требует разработки высокопроизводительных алгоритмов управления, способных работать в реальном времени при высоких частотах дискретизации. Использование искусст-

венного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) открывает новые горизонты для преодоления вычислительного «узкого места» и дальнейшего повышения энергоэффективности систем.

Цель работы – провести глубокий анализ существующих и перспективных алгоритмов управления МПЧ с акцентом на применение технологий ИИ и МО для повышения энергетической эффективности и динамических характеристик электропривода.

В работе решены следующие задачи: выполнено сравнение энергетических и массогабаритных показателей МПЧ и традиционных преобразователей; проанализированы ограничения классических методов управления; дана оценка эффективности применения искусственных нейронных сетей и глубокого обучения с подкреплением в задачах управления током МПЧ; систематизированы результаты экспериментальных исследований, подтверждающих превосходство интеллектуальных алгоритмов.

Исторически для МПЧ применялась пространственно-векторная модуляция (*Space Vector Modulation – SVM*). При *SVM* вычисляются не мгновенные значения напряжений, прикладываемых к обмоткам, а моменты подключения обмоток к силовому мосту с целью формирования заданного вектора напряжения. *SVM* обеспечивает синусоидальность токов и управление коэффициентом мощности, однако ограничена коэффициентом передачи напряжения 0,866 и высокой сложностью реализации при несимметричных режимах сети.

Модельно-прогностическое управление (*Model Predictive Control – MPC*) стало популярным благодаря быстрому динамическому отклику и легкости учета системных ограничений. *MPC* использует динамическую модель процесса для прогнозирования его поведения в будущем временном интервале, а затем оптимизирует управляющие воздействия с учетом ограничений. Главный недостаток *MPC* – колоссальная вычислительная нагрузка. Для выбора оптимального состояния на каждом шаге необходимо рассчитывать целевую функцию для 27 состояний, а при многошаговом прогнозировании нагрузка возрастает экспоненциально.

Одной из наиболее эффективных стратегий является имитационное обучение, где искусственная нейронная сеть (*Artificial Neural Network – ANN*) обучается на данных, полученных от *MPC*-контроллера.

В экспериментах время выполнения 2-шагового *MPC* составило 14,62 с, тогда как обученная *ANN* выполнила ту же задачу за 0,99 с. Это почти 15-кратное ускорение позволяет использовать более высокую частоту дискретизации.

*ANN*-контроллер показал коэффициент суммарных гармонических искажений (*Total Harmonic Distorsions – THD*) тока нагрузки на уровне 1,85 %, превзойдя классический 1-шаговый *MPC* с его 2,23 %.

При резком изменении нагрузки пиковый выброс тока в системе с *ANN* составил 10,6 А, в то время как у *MPC* – 30,2 А.

Инновационный подход на базе алгоритма обучения с подкреплением (*Deep Q-Network – DQN*) позволяет агенту обучаться оптимальной стратегии управления путем прямого взаимодействия со средой (МПЧ).

Симуляционные тесты показали, что *DQN* обеспечивает среднеквадратичную ошибку (*Mean Squared Error – MSE*) тока нагрузки 0,0396, что существенно точнее показателей *MPC* (0,202).

Таким образом, вся вычислительная сложность переносится на этап оффлайн-обучения, что позволяет использовать недорогие процессоры для реализации алгоритма в режиме реального времени.

Нечеткая логика (*Fuzzy Logic Control – FLC*) эффективно применяется для управления приводами в тяжелых условиях с неопределенными параметрами, например, в цементной промышленности. Применение *FLC* в связке с МПЧ позволяет: минимизи-

ровать пульсации момента, плавно адаптировать скорость асинхронного двигателя к колебаниям нагрузки на мельницах и дробилках, снижая тепловые потери и механический износ.

Для реализации сложных нейросетевых алгоритмов в реальном времени все чаще используются системы на кристалле (*System-on-a-Chip – SoC*), объединяющие микропроцессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС/*FPGA*). Использование специализированных гибридных аналого-цифровых нейропроцессоров позволяет еще больше снизить энергопотребление самих систем управления за счет выполнения вычислений непосредственно внутри памяти (*In-Memory Computing*), что дает до 100 раз меньшее энергопотребление по сравнению с классическими графическими процессорами.

Анализ современных алгоритмов управления МПЧ показывает, что интеграция искусственного интеллекта является ключом к созданию энергоэффективного электропривода нового поколения:

1. МПЧ обеспечивает КПД до 98 % и сокращение объема устройства в 2 раза за счет исключения звена постоянного тока.

2. Использование нейронных сетей позволяет сократить время выполнения сложных прогностических алгоритмов более чем в 10–15 раз при сохранении или улучшении качества выходного тока (*THD* < 2 %).

3. Методы глубокого обучения с подкреплением (*DQN*) демонстрируют пятикратное превосходство в точности управления током по сравнению с классическими методами *MPC*.

Будущие исследования должны быть направлены на создание автономных систем онлайн-обучения и диагностику состояния силовых ключей с помощью ИИ для повышения живучести электротехнических комплексов.

Литература

1. Novel Deep Reinforcement Learning-Based Current Control Method for Direct Matrix Converters / Yao Li, Lin Qiu, Xing Liu [et al.] // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 2146.
2. Sharma, A. AI Control Based Matrix Converter Fed Induction Motor Drives in Cement Industries / Akshay Sharma, Vinod Kumar // Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent and Sustainable Power and Energy Systems (ISPES 2024). – P.140–149.
3. Gounder, Y. K. Application of machine learning controller in matrix converter based on model predictive control algorithm / Y. K. Gounder, Sowkarthika Subramanian // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). – 2023. – Sept. – Vol. 14, N 3. – P. 1489–1496.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Чжан Лифан**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, Шаньдунский технологический институт Хуаюй, г. Дэчжоу, Китайская Народная Республика*

Научный руководитель В. А. Савельев

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь,*

*Проведен комплексный анализ программных фреймворков и методов оптимизации моделей машинного обучения для работы на микроконтроллерах с крайне ограниченными*