

М.В. ЗЕЛЕНИН, аспирант факультета мехатроники и автоматизации  
(НГТУ)

Научный руководитель: Д.А. КОТИН, к.т.н., доцент (НГТУ)  
г. Новосибирск

## **ДИАГНОСТИКА МЕЖВИТКОВОГО ЗАМЫКАНИЯ В ДВИГАТЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ VISION TRANSFORMER И ДИСТИЛЛЯЦИИ ЗНАНИЙ**

### **Аннотация**

В обзоре представлен инновационный метод диагностики межвиткового замыкания в синхронных двигателях с постоянными магнитами, разработанный китайскими исследователями. Метод комбинирует технологию Vision Transformer (ViT) и дистилляцию знаний, что позволяет достичь высокой точности диагностики при сохранении возможности практического внедрения в промышленности. Рассматриваются теоретические основы, архитектура и практические результаты метода.

### **Ключевые слова:**

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) широко используются в промышленности благодаря высокой эффективности и надежности [1]. Одной из наиболее сложных и критических неисправностей СДПМ является межвитковое замыкание обмотки статора. На начальных стадиях эта неисправность слабо влияет на рабочие параметры, но может быстро прогрессировать, приводя к серьезным повреждениям и дорогостоящим простоям. Традиционные методы диагностики, основанные на анализе вибрации или токовых сигналов, часто недостаточно чувствительны для раннего обнаружения таких замыканий [2].

Предложенный метод состоит из двух ключевых этапов.

### *Преобразование данных в изображения*

Исходные данные – трехфазный ток статора – преобразуются в двумерные изображения с помощью метода Gramian Angular Summation Fields (GASF). Этот подход сохраняет временные зависимости и паттерны сигналов, которые теряются при традиционном анализе (рисунок 1).

### *Двухэтапная архитектура диагностической системы*

Модель-учитель: используется Vision Transformer (ViT), который обеспечивает исключительную точность классификации состояния двигателя за счет анализа глобальных зависимостей в данных (рисунок 2). Недостаток ViT – высокая вычислительная сложность, что затрудняет его промышленное внедрение.

Модель-ученик: компактная сверточная нейронная сеть (CNN), которая обучается с помощью дистилляции знаний. Этот процесс позволяет CNN перенять «опыт» большой модели-учителя, достигая сопоставимой точности при значительно меньших вычислительных затратах.

Эксперименты показали следующие результаты:

Высокая точность: метод продемонстрировал точность свыше 99% в классификации различных степеней межвиткового замыкания, превосходя традиционные подходы.

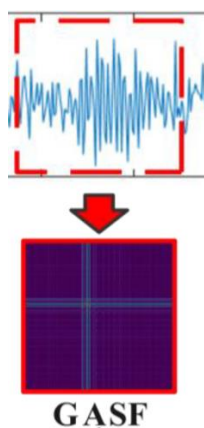


Рис. 1. Преобразование GASF

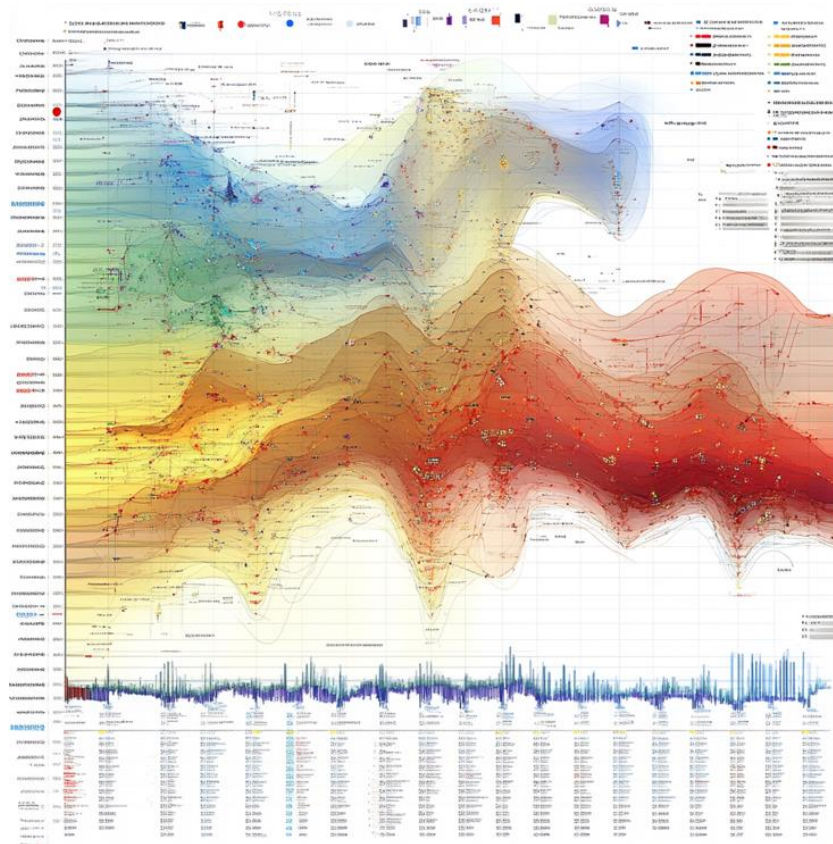


Рис. 2. Vision Transformer (ViT)

Эффективность дистилляции: CNN после дистилляции знаний достигла точности, практически идентичной модели ViT, что подтвердило возможность снижения вычислительной сложности без потери качества диагностики.

Практическая применимость: благодаря использованию компактной CNN, метод может быть развернут в реальных промышленных системах с ограниченными ресурсами.

Исследование представляет собой значительный шаг в диагностике электродвигателей. Комбинация ViT и дистилляции знаний успешно решает ключевую проблему промышленного ИИ – совмещение высокой точности с возможностью практического внедрения.

Внедрение в автомобилестроение (электромобили), энергетику и автоматизацию производственных линий [3,4].

Адаптация для диагностики других типов неисправностей электродвигателей.

#### Список литературы:

1. Обоснование применения метода скользящих режимов для управления скоростью СДПМ = Justification of the application of the sliding mode method for controlling the speed of the PMSM / М. Е. Мосин, Н. С. Попов, Е. А. Домахин, М. Е. Вильбергер. – DOI 10.15518/isjaee.2024.03.081-090. – Текст : непосредственный // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 3 (420). – С. 81–90.

2. Зеленин М. В. Диагностика неисправностей электродвигателей с использованием искусственного интеллекта / М. В. Зеленин ; науч. рук. Н. С. Попов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 17 Всерос. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 4–8 дек. 2023 г. : в 11 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2024. – Ч. 5. – С. 125–128. – 100 экз. – ISBN 978-5-7782-5133-5.

3. Увеличение запаса хода автономного безрельсового транспортного средства с применением алгоритмов нечеткой логики = Increasing the driving range of an autonomous vehicle using fuzzy logic algorithms / М. Е. Вильбергер, Н. С. Попов, Е. А. Домахин, В. И. Аниброев, М. Е. Мосин. – DOI 10.15518/isjaee.2024.02.100-115. – Текст : непосредственный // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 2 (419). – С. 100–115.

4. Система распределения мощности двигателей полноприводного автономного электрического транспортного средства = An engine power distribution system for all-wheel drive autonomous electric vehicles / М. Е. Вильбергер, Н. С. Попов, Е. А. Домахин, В. И. Аниброев, М. Е. Мосин. – Текст : непосредственный // Вопросы электротехнологии = Journal of electrotechnics : науч.-техн. журн. – 2022. – № 2 (35). – С. 60–69.

Информация об авторах:

Зеленин Максим Викторович, аспирант факультета мехатроники и автоматизации, НГТУ, 630099, г. Новосибирск ул. Трудовая, д. 25/1, propik22@mail.ru

Котин Денис Алексеевич, к.т.н., доцент, НГТУ, 630099, г. Новосибирск, ул. Трудовая, д. 25/1, d.kotin@corp.nstu.ru