

сурсы системы *TinyML* настолько ограничены, что их нельзя тратить на операционную систему, что исключает использование стандартных функций ОС, таких как динамическое распределение памяти.

Исследования *TinyML* в значительной степени сосредоточены на классификации изображений и аудио, уделяя меньше внимания другим областям, таким как *PdM*.

На данный момент наблюдается дефицит высококачественных открытых наборов данных, специально разработанных для *TinyML*. Особенно это касается *PdM*, где данные об отказах редко публикуются из-за их чувствительности для организаций.

В качестве наиболее перспективных направлений исследований следует выделить:

- разработку высококачественных датасетов *PdM*;
- исследование систем *TinyML*, которые могут работать прерывисто, когда доступна мощность, что повысит устойчивость решений;
- работы по стандартизации, особенно форматов моделей и методов оптимизации, для облегчения перехода от исследований к крупномасштабному промышленному развертыванию;
- уделить больше внимания разработке методов объяснимого ИИ для *TinyML* систем, что важно для принятия решений в критически важных промышленных приложениях.

Литература

1. Review of the TinyML Stack for Predictive Maintenance / E. Njor, M.A. Hasanpour, J. Madsen, X. Fafoutis // IEEE Access. – 2024 (12). – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10781407> (дата обращения: 12.10.2025).
2. Раджен, Б. Создание IoT-приложений с помощью *TinyML* и машинного обучения / Б. Раджен // Control Engineering Россия. – 2022. – № 3 (99). – С. 50–53.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТРИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Чжан Чжунбинь, В. А. Савельев

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Матричные преобразователи частоты (МПЧ) представляют собой перспективную AC/AC технологию, предлагающую уникальные преимущества: высокую плотность мощности (благодаря отсутствию конденсатора звена постоянного тока), двунаправленную передачу энергии, а также синусоидальные входные и выходные токи с высоким коэффициентом мощности. Основной технологической проблемой МПЧ остается безопасная коммутация двунаправленных ключей, требующая сложных многошаговых стратегий. В области управления активно развивается модельное предиктивное управление (MPC), обеспечивающее быстрый динамический отклик.

Ключевые слова: матричный преобразователь, двунаправленные ключи, модельное предиктивное управление, качество электроэнергии.

PROSPECTS FOR APPLICATION AND CURRENT ISSUES OF MATRIX FREQUENCY CONVERTERS

Zhang Zhongbin, V. A. Savelyev

Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus

Matrix converters are a promising AC/AC technology offering unique advantages: high power density (due to the absence of a DC link capacitor), bidirectional power transfer, and

sinusoidal input and output currents with a high power factor. The main technological challenge for MPCs remains the safe switching of bidirectional switches, which requires complex multi-step strategies. Model predictive control (MPC), which provides fast dynamic response, is actively developing in the field of control.

Keywords: matrix converter, bidirectional switches, model predictive control, power quality.

Матричные преобразователи (МПЧ) представляют собой технологию преобразования переменного тока в переменный ток, обладающую рядом привлекательных характеристик, включая высокую удельную мощность и возможность двунаправленного потока энергии [1].

Основная структура МПЧ состоит из девяти двунаправленных ключей, расположенных в виде матрицы. МПЧ способен регулировать выходную частоту и напряжение, при этом обеспечивая синусоидальные входные и выходные токи с возможностью контроля входного коэффициента мощности. Отсутствие громоздкого конденсатора звена постоянного тока делает МПЧ компактным решением, потенциально обеспечивающим высокую плотность мощности и работу при повышенных температурах.

Используя соответствующие способы модуляции МПЧ, можно достичь единичного входного коэффициента мощности. Это минимизирует потери в сетевых компонентах, таких как генераторы и трансформаторы, и снижает гармонические искажения до уровня менее 5%.

МПЧ являются полностью рекуперативными приводами, что позволяет возвращать энергию в сеть. Это устраняет необходимость в установке внешних тормозных резисторов.

Индуктивность, необходимая для входного фильтра МПЧ, обычно значительно меньше, чем для эквивалентного по мощности *РВМ*-выпрямителя.

Несмотря на значительные преимущества, внедрение МПЧ в промышленные масштабы сталкивается с несколькими серьезными технологическими проблемами.

Цель настоящей работы состоит в определении проблем МПЧ, требующих приоритетного решения.

Ключевой проблемой МПЧ является проблема коммутации [2]. В отличие от распространенных преобразователей со звеном постоянного тока, в МПЧ неправильная коммутация может привести к короткому замыканию на стороне входа или разрыву цепи на стороне индуктивной нагрузки, что, в свою очередь, вызывает опасные перенапряжения и повреждение ключей.

Теоретический максимальный коэффициент передачи напряжения МПЧ ограничен значением 0,866. Это ограничение часто рассматривается как главный недостаток МПЧ, особенно при попытке прямой замены промышленных инверторов напряжения.

МПЧ требует девяти двунаправленных ключей. На практике двунаправленные ключи реализуются с помощью дискретных однонаправленных ключей (например, IGBT и диодов). Наиболее распространенными конфигурациями являются: конфигурация с общим эмиттером и конфигурация с общим коллектором (два IGBT и два диода). Эти конфигурации имеют меньшие потери по сравнению с мостовой схемой с диодами, поскольку путь тока включает только один IGBT и один диод, и коммутация является мягкой.

Из-за прямой связи между входом и выходом, МПЧ подвержен проблемам стабильности. Эффективная работа требует точного расчета и реализации входного фильтра (обычно LC с демпфирующим резистором), чтобы избежать резонанса, возбуждаемого гармониками сети или модуляцией преобразователя.

Современные исследования направлены на разработку стратегий управления, которые улучшают характеристики МПЧ, особенно в отношении динамики и качества диаграмм тока и напряжения.

В настоящее время активно применяется модельное предиктивное управление (*Model Predictive Control, MPC*). *MPC* использует математическую модель системы для прогнозирования ее будущего поведения на заданном временном интервале. Модель МПЧ включает модель самого преобразователя и модель нагрузки. Основным недостатком *MPC* является переменная частота переключения. Это приводит к широкому спектру гармоник и ухудшению качества осциллограмм в установившемся режиме.

Внедрение ключей с симметричной пробойной характеристикой (*Reverse Blocking IGBT*) является наиболее перспективным аппаратным решением для МПЧ. Эти ключи обладают симметричной характеристикой блокировки напряжения, устраняя необходимость в антипараллельных диодах. Это значительно упрощает структуру двунаправленного ключа и решает многие проблемы коммутации, а также снижает потери. На данный момент *RB-IGBT* не получили широкого промышленного распространения в крупных приложениях.

Матричные преобразователи частоты обладают уникальным набором преимуществ. Однако основными проблемами по-прежнему остаются проблема безопасной коммутации и ограничение коэффициента передачи напряжения. На аппаратном уровне ключевым направлением является внедрение *RB-IGBT*.

Литература

1. Empringham, L. Technological Issues and Industrial Application of Matrix Converters: A Review / L. Empringham // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – Vol. 60, N. 10.
2. Soltanian, F. A Review of Commutation Problem in Matrix Converter / F. Soltanian // International Journal Of Computers. – 2019. – Vol. 13.

СИСТЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ

Цзя Шусян, М. Н. Погуляев

*Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

*Шаньдунский технологический университет Хуаюй, г. Дэчжоу,
Китайская Народная Республика*

Представлены результаты исследований систем нагружения резервных дизель-генераторов, приведен сравнительный анализ их характеристик, даны рекомендации по применению.

Ключевые слова: система нагружения, устройство нагружения, резервный дизель-генератор, статический преобразователь.

STANDBY DIESEL GENERATOR LOADING SYSTEMS

Jia Shuxiang, M. N. Pogulyaev

Sukhoi State Technical University of Gomel, Republic of Belarus

Shandong Huayu University of Technology, Dezhou, People's Republic of China

This article presents the results of a study of standby diesel generator loading systems, provides a comparative analysis of their characteristics, and provides recommendations for use.

Keywords: loading system, loading device, standby diesel generator, static converter.

Резервные электрогенераторы (РЕГ) применяются для обеспечения электроэнергией критически важных объектов в случае отключения основного источника