

З.М. НЕРАЗИК, студент гр. ЭАм-251 (КузГТУ)
Научный руководитель А.В. ГРИГОРЬЕВ, к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКИ

Асинхронные тяговые электродвигатели (АТЭД) широко применяются в современных электромобилях и железнодорожном подвижном составе благодаря своей надёжности, простоте конструкции и низкой стоимости обслуживания. Однако при переменной нагрузке – характерной для городского цикла движения, разгона и торможения – такие двигатели часто работают вне оптимального режима, что приводит к снижению энергоэффективности и увеличению потерь. В связи с тем, что асинхронные двигатели являются крупнейшими потребителями электроэнергии, разработка и внедрение энергоэффективных систем управления остаётся экономически оправданной и актуальной задачей [1].

1. Оптимизация управления посредством частотно-регулируемого привода

Одним из ключевых подходов к повышению энергоэффективности АТЭД является применение частотно-регулируемого привода (ЧРП). Современные ЧРП позволяют реализовать как скалярное (U/f), так и векторное управление (FOC – Field-Oriented Control), а также прямое управление моментом (DTC – Direct Torque Control) [6].

В то время как скалярное управление просто в реализации, оно не обеспечивает оптимального использования двигателя при переменной нагрузке. Векторное управление и прямое управление моментом позволяют независимо регулировать магнитный поток и момент, что особенно важно в условиях динамичного изменения нагрузки [6].

В работе [1] предложен метод энергоэффективного скалярного управления, основанный на использовании коэффициента энергоэффективности, определяемого через проводимости ротора и статора. Такой подход позволяет минимизировать потери в обмотках двигателя в установившемся режиме. Авторы показывают, что при оптимальном скольжении, соответствующем максимуму коэффициента энергоэффективности, потери снижаются, а КПД возрастает.

Кроме того, в [2] разработана система энергосберегающего векторного управления тяговым асинхронным двигателем электромобиля на основе синергетической теории управления. Предложенный алгоритм обес-

печивает минимизацию электромагнитных потерь и увеличивает запас хода электромобиля без подзарядки на 40 % по сравнению с традиционными системами [2].

2. Рекуперация энергии при торможении

В условиях переменной нагрузки значительная часть энергии теряется при торможении. Применение рекуперативного торможения позволяет преобразовывать кинетическую энергию обратно в электрическую и возвращать её в тяговую сеть или аккумуляторную батарею. Эффективность рекуперации зависит от возможностей инвертора, состояния аккумулятора и алгоритмов управления [3].

В работе [3] показано, что при торможении асинхронный двигатель переходит в генераторный режим, когда скорость вала превышает скорость вращения магнитного поля. При этом энергия «возвращается» в промежуточное звено постоянного тока. Если используется тормозной резистор, энергия рассеивается в виде тепла, однако при наличии накопителя (например, увеличенной ёмкости звена постоянного тока) энергия может быть повторно использована. Экспериментально подтверждено снижение энергопотребления на 16,7 % при использовании внутренней рекуперации вместо тормозного резистора [3].

В электромобилях эффективность рекуперации достигает 20-35 %, что позволяет увеличить пробег на 15-30 % в городском цикле [6]. Например, в Tesla Model 3 рекуперация обеспечивает до +100 км дополнительного пробега [6].

Таблица 1

Прирост пробега легковых автомобилей при применении рекуперации

Модель электромобиля	Средний возврат энергии (%)	Запас хода без рекуперации (км)	Запас хода с рекуперацией (км)	Прирост пробега (%)
Tesla Model 3	25-30	~380	450-480	+15-25
Volkswagen ID.4	20-25	~340	400-420	+15-20
Nissan Leaf	20-30	~250	300-320	+20-25

4. Интеллектуальные алгоритмы управления на основе прогнозирования нагрузки

Современные тяговые приводы всё чаще интегрируются с бортовыми информационными системами, что открывает возможности для применения предиктивных (прогнозирующих) стратегий управления. Такие алгоритмы используют данные из внешних источников – GPS, карт местности, данных о дорожном движении, истории поездок – для формирования прогноза профиля нагрузки на ближайшем участке пути.

В работе [5] отмечается, что использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) позволяет не только повысить безопасность и пропускную способность дорог, но и оптимизировать энергопотребление подвижного состава.

Таким образом, интеграция данных от навигационных систем с алгоритмами управления АТЭД позволяет снизить перерегулирование, минимизировать потери и повысить общий КПД привода.

Заключение

Повышение энергоэффективности асинхронного тягового электродвигателя в условиях переменной нагрузки требует комплексного подхода, сочетающего совершенствование конструкции, применение современных систем управления и интеллектуальных алгоритмов. Особенно перспективны гибридные методы, объединяющие векторное управление, рекуперацию энергии и предиктивную оптимизацию. Внедрение таких решений не только увеличивает пробег электромобиля на одном заряде, но и снижает эксплуатационные расходы и экологическую нагрузку, что делает их крайне актуальными в контексте глобального перехода к устойчивому транспорту.

Список литературы:

1. Васильев Д. А., Пантелеева Л. А., Покоев П. Н., Носков В. А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем // Вестник НГИЭИ, 2019. – № 4 (95). – С. 100-115. – URL: https://vestnik.ngiei.ru/?page_id=1733 (дата обращения 02.11.2025).

2. Адиняев А. В., Попов, А. Н. Разработка системы энергосберегающего управления силовой установкой электромобиля с тяговым асинхронным двигателем // Инженерный вестник Дона, 2020. – №12 – URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6727> (дата обращения 02.11.2025).

3. Андреев, А. Н., Несговоров, Е.В., Королев, Т.В., Колесниченко, Д.А., Колесниченко, Н.М. Эффективность внутренней рекуперации энергии в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Вестник Череповецкого государственного университета, 2015. – №7. – С. 5-8. – URL: <https://vestnik-chsu.ru/upload/uf/727/u2ez6euxb8m9rqsyr2oig88gody0jwx9.pdf> (дата обращения 02.11.2025).

4. Пшихопов, В.Х., Гайдук, А.Р., Медведев, М.Ю., Беляев, В.Е., Полуянович, Н.К., Волошенко, Ю.П. Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки Тематический выпуск, 2019. – № 2. – С. 192-200. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoberegayuschee-upravlenie-tyagovymi-privodami-elektropodvizhnogo-sostava> (дата обращения 02.11.2025).

5. Егоров, С.В., Шиционок, П.В., Ерпылева, А.И., Жарков, Д.И. Мировой и российский опыт применения интеллектуальных транспортных систем // Журнал «Транспортное дело России», 2022. – №2 – С. 130-136. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovoy-i-rossiyskiy-opyt-primeneniya-intellektualnyh-transportnyh-sistem/viewer> (дата обращения 02.11.2025).

6. Рекуперация энергии в электромобилях: как это устроено и насколько эффективно? Электронный ресурс: URL: <https://atomobility.ru/recuperaciya-electromobili> (дата обращения 02.11.2025).

Информация об авторах:

Неразик Захар Михайлович, студент гр. ЭАм-251, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, nerazik42@gmail.com

Григорьев Александр Васильевич, к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, gav.eav@kuzstu.ru