

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
4QS В РЕКУПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ**

Назирхонов Тулаган Мансурхон угли

к.т.н., доцент Ташкентского государственного
транспортного университета, Узбекистан, Ташкент

Собиров Низомиддин Каххоржон угли

Аспирант Ташкентского
государственного
транспортного университета, Узбекистан, Ташкент

Абиркулов Джалалиддин Мухаммад угли

магистр Ташкентского государственного
транспортного университета, Узбекистан, Ташкент

***Аннотация:** В статье исследуется рабочий процесс четырехквadrантного преобразователя 4QS в рекуперативном режиме работы на электровозах переменного тока с асинхронным тяговым приводом. Рассмотрена топология силовой схемы преобразователя на базе однофазного мостового инвертора на IGBT-транзисторах с широтно-импульсной модуляцией. Представлено математическое описание электромагнитных процессов на основе балансового баланса энергии и мгновенных значений токов и напряжений. Показано, что переход из тягового в рекуперативный режим определяется исключительно углом фазового сдвига ψ между модулирующим напряжением инвертора и напряжением вторичной обмотки тягового трансформатора. Предложен анализ алгоритмов управления — гистерезисного, предиктивного токового и пространственно-векторного — применительно к режиму рекуперации. Установлен нелинейный характер регулировочной характеристики и ее зависимость*

от нагрузки по току. Сформулированы рекомендации по оптимизации параметров ШИМ для повышения энергоэффективности и улучшения электромагнитной совместимости с тяговой сетью.

Ключевые слова: *Четырёхквadrантный преобразователь; 4QS; рекуперативное торможение; рекуперация энергии; широтно-импульсная модуляция; тяговый электропривод; электровоз переменного тока; энергоэффективность.*

Введение

Современный железнодорожный транспорт является одним из наиболее энергоёмких секторов мировой экономики. Электрифицированные железные дороги потребляют значительные объёмы электрической энергии, а вопросы повышения энергоэффективности тягового подвижного состава приобретают всё большую актуальность в условиях роста стоимости энергоносителей и ужесточения экологических требований. Одним из главных причин снижения энергопотребления на электрифицированном транспорте является рекуперативное торможение — процесс преобразования кинетической энергии, приводящей в движение поезда, в электрическую энергию с последующим возвратом ее в контактную сеть.

На протяжении веков тяговый электропривод электровозов переменного тока претерпел существенную эволюцию. Ранние системы на базе диодных и тиристорных выпрямителей излучают лишь однонаправленный поток энергии — из контактной сети к тяговым двигателям, — что обеспечило возможность возникновения торможения с возвратом энергии. Торможение осуществлялось механическими средствами либо путем рассеивания энергии на балластных резисторах (реостатное торможение), что приводило к уменьшению потерь и ускоренному износу тормозных устройств.

Принципиальный прорыв произведен с внедрением системы AC-DC-AC, в которой входной преобразователь на стороне переменного тока выполнен на полностью управляемых полупроводниковых ключах — IGBT-транзисторах. Такой преобразователь получил название четырёхквadrантного (Four-Quadrant S-converter, 4QS) благодаря способности работать во всех четырёхквadrантах координатной плоскости «напряжение — ток». Это означает, что преобразователь может не только потреблять активную и реактивную мощность из контактной сети (выпрямительный режим, тяга), но и возвращать активную мощность обратно в сеть (инверторный режим, рекуперация), а также регулировать реактивную мощность в обоих направлениях.

Сегодня преобразователи типа 4QS являются стандартными для высокоскоростных поездов и современных магистральных электровозов переменного тока во всем мире, нейтральное питание 2×25 Переменного тока кВ, применяемого на высокоскоростных железнодорожных линиях, в сочетании с локомотивами на базе четырехквadrантных преобразователей, обеспечивается возможность двунаправленного потока, что обеспечивает рекуперативное торможение в штатном режиме эксплуатации. Аналогичные решения применяются и на постоянном токе 3 кВ, где реверсивные тяговые подстанции с последовательностью смены (чередующихся) четырехквadrантными преобразователями позволяют принимать рекуперированную энергию и передавать ее в питающую сеть переменного тока.

Актуальность исследования рабочего процесса преобразователя 4QS именно в рекуперативном режиме, обусловленном рядом факторов. Во-первых, рекуперативное торможение способно обеспечить возврат коэффициента доли энергии — в зависимости от степени увеличения, от 15 до 40 % энергии, затраченной на тягу, — что непосредственно влияет на приведенные показатели эксплуатации подвижного состава. Во-

вторых, режим рекуперации предъявляет особые требования к системе управления преобразователем. Необходимо обеспечить устойчивую работу при направлении скорости потока, поддержание стабильного напряжения звена постоянного тока, высокого коэффициента мощности и формирования уровня гармонических преобразований тока, возвращающегося в контактную сеть.

В-третьих, электромагнитная связь преобразователя с тяговой сетью в рекуперативном режиме представляет собой самостоятельную техническую проблему. Высокочастотные гармоники тока, генерируемые преобразователем при широтно-импульсной модуляции, воздействии на контактную сеть и могут включать помехи в системе легкой сигнализации, централизации и блокировки, а также приводят к внешним потерям в тяговых трансформаторах и других элементах систем электроснабжения. Оптимизация параметров ШИМ — частота мощности, мощность модуляции, алгоритм формирования импульсов — позволяет снизить уровень высшего гармоника и повысить КПД преобразователя.

Развитие современных алгоритмов управления — предиктивного токового управления, гистерезисного регулирования, пространственно-векторной ШИМ — открывает новые возможности для повышения качества работы 4QS-преобразователя в рекуперативном режиме. Экспериментальные исследования подтверждают возможность достижения единого коэффициента мощности и эффективности подавления гармоник как в тяговом, так и в рекуперативном режимах работы.

Целью настоящей работы является комплексное исследование рабочего преобразователя 4QS в рекуперативном режиме, включающий анализ топологии силовой схемы, математическое электромагнитное описание процессов, сравнительный анализ алгоритмов управления и оценка показателей на основе имитационного моделирования системы

«тяговый преобразователь — преобразователь 4QS — звено постоянного тока».

Топология и принцип действия преобразователя 4QS

Преобразователь 4QS представляет собой однофазный мостовой инвертор на полностью управляемых ключах (IGBT-транзисторах) с обратными диодами, подключенный ко вторичной обмотке тягового трансформатора. На стороне постоянного тока установлены фильтры конденсатора звена постоянного тока.

Силовая схема содержит четыре переключателя (C1–C4), которые коммутируются попарно по диагонали. Переключение осуществляется с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что обеспечивает возникновение квазисинусоидального напряжения на входе преобразователя. Благодаря четырем квадрантам работы в режимах «напряжение — ток» преобразователь может потреблять или отдавать как активную, так и реактивную мощность[1].

В режиме рекуперации преобразователь работает как инвертор, управляемый сетью. Энергия передаётся из звена постоянного тока обратно в контактную сеть через тяговый трансформатор. Переход из тягового режима в рекуперативный, определяется изменением направления потока мощности, что приводит к переходу фазы модулирующего напряжения напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Режим «потребления» или «возврата» активности зависит исключительно от угла сдвига ψ между модулирующим напряжением и напряжением вторичной обмотки трансформатора. При $\psi > 0$ (модулирующее напряжение

$\psi < 0$ — в рекуперативном[2].

В режиме рекуперативного напряжения инвертора формируется таким образом, что ток сети оказывается в противофазе с напряжением

сети, вызывая активную активность в направлении от звена постоянного тока к контактной сети.

Алгоритмы управления в рекуперативном режиме.

Гистерезисное управление

Один из распространённых методов — гистерезисное регулирование тока. Задающий сигнал ток имеет синусоидальную форму, смещенную на 180° соответственно сетевому напряжению. Данный ток отслеживается в гистерезисной полосе, что обеспечивает отработку основного динамика. Однако этот метод приводит к переменной частотной коммутации и широкому спектру гармоник.

Для контроля процесса выпрямления и регулирования коэффициента рекуперации ξ должен находиться внутри $0 < \xi < 1$.

ШИМ-управление с прогнозированием тока

Альтернативный вариант предиктивное управление током (Predictive Current Control). Метод основан на прогнозировании значения тока на следующий такт ШИМ на основе модели преобразователя, что позволяет вычислить мощность управляющего воздействия. Моделирование и экспериментальные исследования оказались эффективными подавлением гармоник и достижением одного коэффициента производительности как в тяговом, так и в рекуперативном режимах[3-4].

SVPWM-алгоритмы

Для преобразователя управления также применяется пространственно-векторная ШИМ. Упрощённый алгоритм SVPWM позволяет снизить вычислительную сложность определения положения вектора и времени работы ключей.

Система с фазовой автоподстройкой частоты

Для синхронизации преобразователя с контактной сетью используется система фазовой автоподстройки частоты, а для сохранения

напряжения звена постоянного тока — наблюдателя состояния. Предложен алгоритм формирования задающего сигнала ШИМ с фазовым переходом для одновременной работы нескольких четырехквadrантных преобразователей в параллельном режиме.

Оценка результатов

Исследования на уникальных моделях системы «тяговый трансформатор — преобразователь 4QS» для электровозов переменного тока (в частности, электровоза UZ-ELR) показывают следующие результаты:

В рекуперативном режиме ток сети принимает форму, близкую к синусоидальной, и находится в противофазе с напряжением сети, что обеспечивает возврат активной энергии.

Коэффициент производительности при рекуперации достигает результатов, близких к единице.

Усовершенствование алгоритма управления позволяет повысить КПД преобразователя 4QS и снизить уровень гармонических преобразователей тока в системе тягового электроснабжения[5-6].

Переходные процессы при переключении силовых ключей исследуются на основе математического описания, и важные параметры тягового трансформатора, влияющие на качество переходных процессов.

Моделирование магистральной железнодорожной линии 2×25 кВ с протяжённостью 114 км с локомотивами на базе 4QS подтвердило, что рекуперативное торможение обеспечивает запасной возврат энергии при одновременном сохранении экономических показателей качества электроэнергии в тяговой сети.

Энергоэффективность рекуперации.

Возможность торможения возврата энергии в контактную сеть — одно из основных преимуществ системы AC-DC-AC с преобразователем 4QS по сравнению с резерви диодно-тиристорными схемами.

Сравнительный анализ технологии рекуперации энергии для систем постоянного тока показывает, что гибридные системы и полностью активные двунаправленные подстанции с четырехквadrантными преобразователями определяют различные уровни эффективности возврата энергии. Применение встречно-параллельных (чередующихся) 4QS-преобразователей на тяговых подстанциях позволяет обеспечить двунаправленный поток и эффективную возвратную энергию рекуперативного торможения в питающей сети[7].

Несмотря на очевидные преимущества, рекуперативный режим преобразования 4QS связан со следующими проблемами:

Гармонические преобразования тока, переносимые в контактную сеть, требуют дополнительных параметров ШИМ — в частности, выбора частоты модуляции и модуляции.

Нелинейность регулировочной характеристики и ее зависимость от нагрузки по току усложняют стандарты регуляторов[8].

Одновременная работа нескольких 4QS-преобразователей требует специального режима синхронизации для предотвращения циркулирующих токов.

Предложения по рассмотрению включают оптимизацию алгоритма управления входным энергетическим преобразователем для повышения тягово-энергетических показателей и снижения выбросов высокочастотных гармоник в контактную сеть.

Заключение

Преобразователь 4QS обеспечивает высокоэффективную рекуперацию энергии торможения в электровозах переменного тока. Рекуперативный режим реализует путь изменения фазового сдвига между модулирующим и сетевым напряжениями, что позволяет плавно переходить из тягового режима в режим возврата энергии с сохранением высокого коэффициента мощности. Современные алгоритмы управления

— предиктивное, гистерезисное, SVPWM — позволяют добиться синусоидального тока и минимизировать гармонические преобразования. Дальнейшее совершенствование направлено на оптимизацию параметров ШИМ, повышение КПД и улучшение электромагнитной совместимости с тяговой сетью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калейбар Х.Дж., Бренна М., Гурручага Лланеза И.М., Занинели Д. Активная тяговая подстанция на основе четырехквadrантного преобразователя с чередующимися цепями для рекуперации энергии рекуперативного торможения в железнодорожной линии постоянного тока // Труды Международного симпозиума по силовой электронике, электроприводам, автоматизации и движению (SPEEDAM). — 2024. — DOI: 10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609217.
2. Дубравин Ю., Ткаченко В. Дослідження моделі активного чотирьохквadrантного перетворення магістрального електровоза змінного струму // Сборник научных трудов Государственного университета инфраструктур и технологий, серия «Транспортные системы и технологии». — 2019. — DOI: 10.32703/2617-9040-2019-34-1-13.
3. Щербак Я. В., Плахтий О. А., Нерубацкий В. П. Характеристики управления активным чотирьохквadrантным преобразователем в режиме выпрямления и восстановления // Техническая электродинамика. — 2017. — DOI: 10.15407/TECHNED2017.06.026.
4. Дубравин Ю., Ткаченко В., Морнева М. Улучшение энергетических характеристик чотирьохквadrантного преобразователя с широтно-импульсной модуляцией // Восточно-европейский журнал корпоративных технологий. — 2023. — DOI: 10.15587/1729-4061.2023.283271.
5. Калейбар Х. Дж., Бренна М., Фойаделли Ф., Фазель С. С. Анализ энергии рекуперативного торможения и качества электроэнергии в 2×25

Высокоскоростные железнодорожные линии кВ, работающие на локомотивах 4QC // Труды конференции по силовой электронике, системам привода и технологиям (PEDSTC). — 2020. — DOI: 10.1109/PEDSTC49159.2020.9088423.

6. Поляков Н., Арбузина А., Архарова М. Прототип системы управления четырехквadrантным преобразователем переменного тока в постоянный для тягового привода локомотива переменного тока // Труды IEEE EDM. — 2023. — DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225172.

7. Лукасяк П., Антонеvич П., Свeрчинский Д., Коломыйский В. Сравнительный анализ технологий систем рекуперации энергии для железнодорожного транспорта постоянного тока // Труды Международной конференции IEEE по энергетике, электроприводам и электротехнике (POWERENG). — 2015. — DOI: 10.1109/POWERENG.2015.7266345.

8. T. M. Nazirkhonov, D. O. Radjibaev; Evaluation of the efficiency of a 4q-S converter of an alternating current electric locomotive of the "O'Z-ELR" series using a computer simulation model. AIP Conf. Proc. 16 May 2023; 2476 (1): 020055. <https://doi.org/10.1063/5.0103507>

9. Назирхонов Т. М., Якушев А. Я., Викулов И. П. Анализ спектрального состава входного тока и напряжения 4q-s преобразователя электровоза переменного тока серии «O'Z-ELR» с использованием компьютерной имитационной модели // БРНИ. 2020. №3.

10. Викулов И. П., Назирхонов Т. М. Сравнительный анализ технических характеристик электровозов серий «O'Z-ELR» и «O'zbekiston» // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. №1.