

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 3. Number 91 (2026). Pp. 19–30
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002>
UDC / УДК / ООЖ: 621.311.4:625.1

VOLTAGE REGULATION AND REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRIFIED RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS: ANALYSIS, MODERN SOLUTIONS, AND AUTOMATION PROSPECTS

*A.A. Askarov**

Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan.
E-mail: askarov.d@gmail.com

Azimzhan Askarovich Askarov — doctoral student, Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan
E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© A.A. Askarov

Abstract. The present study investigates the complex problem of voltage regulation and reactive power compensation in the traction power supply systems of electrified railways operating at 27.5 kV and 2×25 kV. The research is motivated by the growing operational challenges at Kazakhstan Temir Zholy (KTZ) network, where extended 220 kV transmission lines up to 400 km in length generate significant capacitive reactive power under light-load conditions, causing voltage deviation beyond permissible limits and complicating automatic voltage regulation. The research object is the external and internal power supply system of electrified railway sections in Kazakhstan; the research subject is the regime characteristics, voltage deviation patterns, and reactive power balance under variable traction load conditions. The paper systematically analyses the influence of traction load harmonics, current asymmetry, and capacitive charging power of long overhead transmission lines on power quality indices. Calculation models based on Π -equivalent circuit representation are developed for five operational sections of KTZ, enabling quantitative assessment of voltage losses (2–7 kV range depending on traffic intensity) and charging reactive power magnitudes. Technical solutions are proposed and evaluated: capacitor banks with harmonic filters, on-load tap-changing (OLTC) transformers, off-circuit tap-changing (OCTC) devices, shunt reactors (3.3 MVAR units), and ferroresonance-controlled saturable reactors (SR) for continuous reactive power regulation. The findings demonstrate that ferroresonance-type controlled reactors represent the most technically feasible and cost-effective solution for automated reactive power management under variable load schedules. Intelligent monitoring and SCADA-integrated control algorithms are proposed as a direction for further development toward Industry 4.0-compliant railway power infrastructure.

Keywords: electrified railway, traction power supply, contact network, reactive power, voltage regulation, traction substation, capacitor bank, shunt reactor

For citation: Askarov A.A. (2026). Voltage regulation and reactive power compensation in electrified railway power supply systems: analysis, modern solutions, and automation prospects // Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 23. No. 91. Pp. 19–30. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (In Russ.).

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

**ЭЛЕКТРЛЕНДІРІЛГЕН ТЕМІРЖОЛ ЭЛЕКТРМЕН ЖАБДЫҚТАУ
ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ КЕРНЕУДІ РЕТТЕУ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ҚУАТТЫ ӨТЕУ:
ТАЛДАУ, ЗАМАНАУИ ШЕШІМДЕР ЖӘНЕ АВТОМАТТАНДЫРУ
ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ**

*А.А. Аскаров**

Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан.

E-mail: askarov.d@gmail.com

Азимжан Аскарлович Аскаров — докторант, Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан
E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© А.А. Аскаров

Аннотация. Зерттеуде 27,5 кВ және 2×25 кВ жүйелері бойынша жұмыс істейтін электрлендірілген теміржолдардың тарту электрмен жабдықтау жүйелеріндегі кернеуді реттеу және реактивті қуатты өтеу мәселелері кешенді түрде қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі «Қазақстан темір жолы» (ҚТЖ) желісіндегі пайдалану қиындықтарының артуымен байланысты, мұнда ұзындығы 400 км-ге дейін жететін 220 кВ электр беру желілері аз жүктеме режимінде айтарлықтай сыйымдылықты реактивті қуат өндіреді, бұл рұқсат етілген шектерден тыс кернеу ауытқуларына және автоматты кернеу реттеу жүйесінің күрделенуіне алып келеді. Зерттеу объектісі ретінде Қазақстанның электрлендірілген теміржол учаскелерінің сыртқы және ішкі электрмен жабдықтау жүйелері қарастырылды, ал зерттеу пәні — айнымалы тарту жүктемесі жағдайындағы режимдік сипаттамалар, кернеу ауытқулары және реактивті қуат балансы. Мақалада тарту жүктемесінің гармоникаларының, ток асимметриясының және ұзын әуе электр беру желілерінің сыйымдылықты зарядтық қуатының электр энергиясы сапасына әсері жүйелі түрде талданған. ҚТЖ-ның бес нақты пайдалану учаскесі үшін П-тәрізді эквиваленттік сұлба негізінде есептеу модельдері әзірленіп, олардың көмегімен қозғалыс қарқындылығына байланысты 2–7 кВ аралығындағы кернеу шығындары мен реактивті қуат шамалары сандық бағаланды. Техникалық шешімдер ретінде гармоникалық сүзгілері бар конденсаторлық батареялар, жүктеме астында реттелетін трансформаторлар (OLTC), жүктемесіз ауыстырып қосылатын құрылғылар (OCTC), шунттық реакторлар (3,3 МВАр модульдері) және реактивті қуатты үздіксіз реттеуге арналған феррорезонанстық басқарылатын қанығатын реакторлар ұсынылып, салыстырмалы түрде бағаланған. Зерттеу нәтижелері феррорезонанстық басқарылатын реакторлардың айнымалы жүктеме кестелері жағдайында реактивті қуатты автоматты басқарудың техникалық және экономикалық тұрғыдан ең тиімді шешімі екенін көрсетті. Сонымен қатар Industry 4.0 талаптарына сәйкес интеллектуалды электрмен жабдықтау инфрақұрылымын қалыптастыру бағытында SCADA-жүйелерімен интеграцияланған интеллектуалды мониторинг және басқару алгоритмдері ұсынылған.

Түйін сөздер: электрлендірілген теміржол, тарту электрмен жабдықтау, түйіспе желісі, реактивті қуат, кернеуді реттеу, тарту қосалқы станциясы

Дәйексөз үшін: Аскаров А.А. (2026). Электрлендірілген теміржол электрмен жабдықтау жүйелерінде кернеуді реттеу және реактивті қуатты өтеу: талдау, заманауи шешімдер және автоматтандыру перспективалары // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 23. № 91. 19–30 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (Орыс. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Автор мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: АНАЛИЗ, СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

*А.А. Аскаров**

Кыргызский Государственный Технический Университет, Бишкек, Кыргызстан.

E-mail: askarov.d@gmail.com

Азимжан Аскарлович Аскаров — докторант, Кыргызский Государственный Технический Университет, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: askarov.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3455-563X>.

© А.А. Аскаров

Аннотация. В настоящей работе исследуется комплексная проблема регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения (СТЭ) электрифицированных железных дорог, работающих на напряжении 27,5 кВ и 2×25 кВ. Актуальность исследования обусловлена растущими эксплуатационными трудностями в сети АО «Национальная компания «Қазақстан темір жолы» (КТЖ), где протяжённые линии электропередачи 220 кВ длиной до 400 км генерируют значительную ёмкостную реактивную мощность в режиме малых нагрузок, вызывая отклонения напряжения за допустимые пределы и затрудняя автоматическое регулирование напряжения. Объектом исследования является внешняя и внутренняя система электроснабжения электрифицированных железнодорожных участков Казахстана; предметом — режимные характеристики, закономерности отклонений напряжения и баланс реактивной мощности в условиях переменной тяговой нагрузки. На основе представления ЛЭП П-эквивалентной схемой разработаны расчётные модели для пяти эксплуатационных участков КТЖ, обеспечивающие количественную оценку потерь напряжения (в диапазоне 2–7 кВ) и величин зарядной реактивной мощности (21,7–55,7 МВАр). Предложены и оценены технические решения: батареи конденсаторов с фильтрами гармоник, трансформаторы с регулированием под нагрузкой (РПН), устройства без возбуждения (ПБВ), шунтирующие реакторы и феррорезонансные управляемые реакторы насыщения (РН) для плавного регулирования реактивной мощности. Показано, что управляемые реакторы феррорезонансного типа являются наиболее технически обоснованным и экономически эффективным решением для автоматизированного управления реактивной мощностью. В качестве направления дальнейшего развития в сторону инфраструктуры железнодорожного электроснабжения, соответствующей стандартам «Индустрии 4.0», предложены интеллектуальные алгоритмы управления с интеграцией в SCADA-системы.

Ключевые слова: электрифицированная железная дорога, тяговое электроснабжение, реактивная мощность

Для цитирования: Аскаров А.А. (2026). Регулирование напряжения и компенсация реактивной мощности в системах тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог: анализ, современные решения и перспективы автоматизации // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 23. No. 91. Стр. 19–30. <https://doi.org/10.58420.ptk.2026.91.03.002> (На русс.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Электрификация железнодорожного транспорта является краеугольным камнем устойчивого развития транспортной системы Республики Казахстан. По состоянию на 2024 год около 4 000 км национальной железнодорожной сети, эксплуатируемой АО «НК «Қазақстан темір жолы» (КТЖ), электрифицировано: на главных ходах применяются системы переменного тока 27,5 кВ и высокопроизводительные автотрансформаторные системы 2×25 кВ (Марквардт, 1989: 5–18). Непрерывный рост грузовых и пассажирских перевозок в сочетании с внедрением мощных многосекционных электропоездов и высокоскоростного тягового подвижного состава предъявляет всё более жёсткие требования к качеству и надёжности тягового электроснабжения.

Три фундаментальных электромагнитных явления составляют основную проблему для инженеров СТЭ. Во-первых, реактивная мощность, потребляемая электропоездами, вызывает существенное падение напряжения вдоль питающих линий контактной сети, способное снизить напряжение ниже минимально допустимого значения 19,5 кВ в системе 27,5 кВ (Мамошин, Зимакова 1991: 45–67). Во-вторых, однофазный характер тяговых нагрузок создаёт токовую и напряжённую несимметрию в питающих трёхфазных сетях 110–220 кВ. В-третьих, силовые электронные преобразователи современного подвижного состава генерируют в сеть богатый спектр нечётных гармонических составляющих — преимущественно 3-й, 5-й, 7-й, 11-й и 13-й порядков, ухудшая качество электроэнергии (Varetsky, Ostroverkhov, Mazur, 2020: 1–12).

Географическая рассредоточенность железнодорожной инфраструктуры Казахстана обуславливает необходимость питания тяговых подстанций от протяжённых воздушных линий электропередачи 110–220 кВ длиной 150–400 км. Такие линии обладают существенной распределённой ёмкостью, генерирующей значительную зарядную реактивную мощность в режиме малых нагрузок, что может привести к росту напряжения на шинах высокого напряжения тяговых подстанций выше допустимого уровня (Ilyushin, Suslov, 2019: 1–6).

Складывающаяся парадигма «Индустрии 4.0», сети датчиков с поддержкой IoT, SCADA-системы и интеллектуальные алгоритмы прогностического управления открывают новое измерение в решении данной проблемы посредством непрерывного мониторинга в режиме реального времени и автоматизированной адаптивной компенсации (Suslov, Solonina, Smirnov, 2022: 49612–49621).

Цель исследования — провести комплексный технический анализ характеристик режима напряжения и баланса реактивной мощности в СТЭ электрифицированных железных дорог Казахстана, а также обосновать оптимальные технические решения по регулированию напряжения и компенсации реактивной мощности, включая современные подходы к автоматизированному управлению.

Задачи исследования: (1) проанализировать электромагнитное воздействие тяговых нагрузок на показатели качества электроэнергии; (2) рассчитать потери напряжения и величины зарядной реактивной мощности для представительных участков КТЖ; (3) провести сравнительную оценку имеющихся технологий компенсации и регулирования; (4) разработать инженерные рекомендации по оптимальному выбору и размещению оборудования; (5) наметить перспективы интеллектуального управления с интеграцией в SCADA.

Научная новизна работы состоит в: систематической количественной характеристике влияния зарядной реактивной мощности на регулирование напряжения для пяти эксплуатационных участков КТЖ; сравнительной технико-экономической оценке компенсирующих технологий в специфических эксплуатационных условиях электрифицированной железнодорожной инфраструктуры Казахстана; формулировке дорожной карты автоматизации управления реактивной мощностью в соответствии с международными стандартами интеллектуальных сетей и «Индустрии 4.0».

Проблема регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в системах тягового электроснабжения железных дорог обстоятельно изучена в классической технической литературе. основополагающие труды Марквардта (Марквардт, 1989) и Мамошина с Зимаковой (Мамошин, Зимакова 1991) заложили аналитическую базу для систем тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ и сформировали методологическую основу расчётов потерь напряжения в питающих линиях контактной сети. Гринберг-Басин (Гринберг-Басин, 1988) дал проектную базу для тяговых подстанций, включая выбор ступеней регулирования трансформаторов и расчёт ёмкостной компенсации.

В области качества электроэнергии генерация гармоник высших порядков тиристорными и IGBT-преобразователями современных электровозов исследована многочисленными авторами. Варецкий и др. показали, что вводимый подвижным составом гармонический ток существенно превышает уровни, принятые в ранее действовавших стандартах проектирования (Varetsky, Ostroverkhov, Mazur, 2020: 1–12). Розен и др. провели натурные измерения в сети КТЖ, зафиксировав коэффициент несинусоидальности тока (THD) до 18–22 % на подстанциях, обслуживающих грузонапряжённые участки (Rosen, Sokhina, Zubkova, 2022: 1–5).

Проблема зарядной мощности протяжённых линий в слабонагруженных системах электроснабжения получила сравнительно меньше внимания в железнодорожном контексте. Илюшин и Суслов проанализировали явление повышения напряжения на линиях 220 кВ, питающих удалённые тяговые подстанции, и предложили алгоритмы размещения шунтирующих реакторов (Ilyushin, Suslov, 2019: 1–6). Чжан и др. исследовали аналогичные явления применительно к электроснабжению китайских высокоскоростных железных дорог, зафиксировав генерацию ёмкостной реактивной мощности 8–15 МВАр на участках длиной 300 км (Zhang et al., 2019: 1044–1058).

В части компенсирующих технологий эволюция от фиксированных батарей конденсаторов к тиристорным устройствам компенсации реактивной мощности (СТК, СТАТКОМ) для железнодорожных применений задокументирована Лю и др. (Lü et al., 2023: 1193) и Фаизом и др. (Faiz, Ghazizadeh, Nekmat, 2021: 1597–1617). Степанов и др. представили экспериментальные результаты установки насыщающегося реактора феррорезонансного типа на тяговой подстанции РЖД, продемонстрировав точность регулирования реактивной мощности в пределах $\pm 0,5$ МВАр (Степанов Егоров, Соколова, 2021: 34–41).

Интеграции управления компенсацией реактивной мощности с SCADA-системами управления тяговым электроснабжением посвящены последние публикации. Налляперума и др. описали архитектуру мониторинга напряжения на базе IoT для подстанций переменного тока с прогностическим алгоритмом компенсации (Nallaperuma et al., 2020: 2024). Е и др. предложили концепцию цифрового двойника для моделирования и оптимизации уставок устройств компенсации реактивной мощности в режиме реального времени (Ye et al., 2022: 1–12). Суслов и др. рассмотрели применение «Индустрии 4.0» в энергетической инфраструктуре железных дорог, определив автоматизированное управление реактивной мощностью как приоритетную инвестиционную область (Suslov, Solonina, Smirnov, 2022: 49612–49621).

Критический анализ рассмотренной литературы позволяет выявить следующие пробелы: (а) ограниченность количественных данных о взаимодействии зарядной реактивной мощности протяжённых линий и переменной тяговой нагрузки в сети КТЖ; (б) отсутствие систематической сравнительной оценки компенсирующих технологий применительно к специфическим эксплуатационным условиям Казахстана; (в) отсутствие опубликованных дорожных карт автоматизации и интеграции SCADA для управления реактивной мощностью на тяговых подстанциях КТЖ. Настоящая статья посвящена устранению указанных пробелов.

Материалы и методы.

В исследовании применяется аналитико-расчётная методология, основанная на представлении воздушных линий электропередачи П-эквивалентной схемой и упрощёнными радиальными моделями для питающих линий контактной сети, дополненная сравнительным инженерным анализом технологий компенсации реактивной мощности.

Объектами исследования являются пять представительных электрифицированных участков АО «НК «Қазақстан темір жолы», питаемых от сети 220 кВ: (1) Астана–Атбасар–Есиль; (2) Сары-Оба–Уленты; (3) Шу–Алматы; (4) Шу–Чиганак; (5) Мын–Арал–Моинты. Данные участки охватывают диапазон длин линий (157,8–405 км) и конфигураций тяговых систем (27,5 кВ и 2×25 кВ), представленных в сети КТЖ.

Методы исследования включают: (1) аналитический расчёт потерь напряжения в питающих линиях контактной сети методом эквивалентных схем; (2) расчёт зарядной реактивной мощности линий методом П-эквивалентной схемы; (3) анализ гармонического спектра тяговых нагрузок на основе параметров качества электроэнергии по стандарту EN 50160:2010 и ГОСТ 32144-2013 (ГОСТ 32144-2013); (4) сравнительный технический анализ технологий компенсации реактивной мощности по количественным критериям эффективности; (5) инженерную экспертизу реализуемости на основе опубликованного эксплуатационного опыта и технических характеристик.

Типовая схема электроснабжения электрифицированной железной дороги предполагает двустороннее питание межподстанционной зоны через пост секционирования (ПС), расположенный приблизительно посередине. Эквивалентная схема сводится к радиальной питающей линии длиной, равной половине длины межподстанционной зоны, т.е. около 20 км при типичном расстоянии между подстанциями 40 км, характерном для главных ходов Казахстана.

Потери напряжения в питающей линии определяются из обобщённого уравнения потокораспределения. Для питающей линии с равномерно распределённой тяговой нагрузкой, представленной n сосредоточенными нагрузками:

$$\Delta U = \frac{\sum_i (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i)}{U_n} \quad (1)$$

где P_i и Q_i — активная и реактивная мощность i -го электровоза [кВт, кВАр]; R_i и X_i — активное и индуктивное сопротивление секции питающей линии от точки питания до i -й нагрузки [Ом]; U_n — номинальное напряжение контактной сети [кВ].

В режиме нормального графика движения (минимальный межпоездной интервал 6 км, длина питающей линии 20 км) расчётные потери напряжения составляют 2–3 кВ, при этом минимальное напряжение на конце питающей линии равно 26,5–27,5 кВ — в пределах допустимого диапазона 19,5–29,5 кВ. В режиме сгущения после «окна» при сокращении межпоездного интервала примерно до 3 км потери напряжения возрастают до 4–7 кВ, снижая минимальное напряжение до 22,5–25,5 кВ; это значение остаётся допустимым при условии поддержания напряжения на вторичных шинах подстанции на уровне 29,5 кВ.

Для протяжённых воздушных линий электропередачи 110–220 кВ удельная реактивная проводимость b_0 [См/км] определяется из рабочей ёмкости C_0 линии:

$$b_0 = \omega \cdot C_0 = 2\pi f \cdot C_0 \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg\left(\frac{D_{CP}}{r}\right)} \cdot 10^{-6} \quad [\Phi/\text{км}] \quad (3)$$

$$b_0 = \frac{7,58}{\lg\left(\frac{D_{CP}}{r}\right)} \cdot 10^{-6} \quad [\text{См}/\text{км}] \quad (4)$$

где $D_{CP} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}$ — среднегеометрическое расстояние между фазными проводами [м]; r — радиус провода [м].

Суммарная зарядная реактивная мощность линии на основе Π -эквивалентной схемы:

$$Q_C = U_N^2 \cdot b_0 \cdot l \quad [\text{MVar}] \quad (5)$$

где U_N — номинальное напряжение линии [кВ]; b_0 — удельная проводимость [См/км]; l — длина линии [км].

Для провода АС-300 ($r = 0,01235$ м, типовое $D_{CP} = 5,5$ м для линий 220 кВ со стандартным расположением фаз) $b_0 \approx 2,86 \times 10^{-6}$ См/км. Для линии 220 кВ длиной 300 км суммарная зарядная реактивная мощность составляет:

$$Q_C = (220)^2 \times 2.86 \times 10^{-6} \times 300 \approx 41.5 \text{ MVar} \quad (6)$$

Столь значительная генерация реактивной мощности в условиях малых или нулевых нагрузок представляет серьёзную проблему для регулирования напряжения, поскольку приводит к повышению напряжения на промежуточных шинах на 5–10 % сверх номинала, приближаясь к максимально допустимому уровню 115 % (критерий изоляции для оборудования класса 220 кВ).

Таблица 1 – Расчётная зарядная реактивная мощность для питающих участков КТЖ 220 кВ

Участок	Длина линии, км	Провод	$b_0, \times 10^{-6}$ См/км	Q_C при мин. нагрузке, МВАр
Астана–Атбасар–Есиль	239 / 157,8	АС-300	2,86	32,8 / 21,7
Сары-Оба–Уленты	260	АС-300	2,86	35,7
Шу–Алматы	290	АС-300	2,86	39,9
Шу–Чиганак	187	АС-300	2,86	25,7
Мын–Арал–Моинты	405	АС-300	2,86	55,7

Примечание. Данные подтверждают, что на всех пяти анализируемых участках КТЖ зарядная реактивная мощность в режиме минимальных нагрузок составляет 21,7–55,7 МВАр. Участок Мын–Арал–Моинты (405 км) является наиболее критичным: зарядная реактивная мощность может вызвать повышение напряжения на конце линии до 235–238 кВ (на 7–8% выше номинала). На всех участках пассивного управления реактивной мощностью посредством трансформаторов с РПН недостаточно — необходимы активные компенсирующие устройства.

Результаты.

Анализ электромагнитного воздействия тяговых нагрузок выявляет три основных механизма ухудшения качества электроэнергии в СТЭ. Во-первых, поток реактивной мощности от индуктивных тяговых двигателей вызывает падение напряжения вдоль питающих линий контактной сети (см. раздел 3.1). Коэффициент мощности современных грузовых электровозов обычно составляет 0,80–0,87, что соответствует потреблению реактивной мощности 1,2–2,4 МВАр на локомотив; при одновременном нахождении 6–7 электровозов на 20-километровой питающей линии суммарная реактивная нагрузка может достигать 8–17 МВАр.

Во-вторых, однофазное подключение тяговых трансформаторов к двум фазам питающей трёхфазной сети 110–220 кВ создаёт несимметрию токов, характеризующую

составляющей обратной последовательности. При максимальной нагрузке коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности может достигать 1,5–2 %, приближаясь к ограничению ГОСТ 32144-2013 в 2 % для сетей общего назначения (ГОСТ 32144-2013). Схемы симметрирования (трансформатор Скотта, трансформатор Вудбриджа, схема «открытый треугольник» с дополнительной мощностью) частично смягчают данный эффект.

В-третьих, силовые электронные преобразователи генерируют гармонические токи с доминирующими составляющими 5-го, 7-го, 11-го, 13-го, 17-го и 19-го порядков для шестипульсных выпрямителей. Натурные измерения на участке Шу–Алматы зафиксировали коэффициенты гармонических составляющих напряжения 3,1 % (5-я), 2,8 % (7-я) и 1,9 % (11-я) на вторичных шинах тяговых подстанций при суммарном коэффициенте несинусоидальности (THDU) 4,8 % — близком к ограничению ГОСТ 32144-2013 в 5 %.

Эксплуатационный опыт тяговых подстанций КТЖ выявляет примечательный факт: на большинстве подстанций, оснащённых устройствами РПН (диапазон регулирования ± 16 ступеней — от 81,5 % до 121,0 % номинального напряжения), функция автоматического регулирования напряжения (АРН) отключена, а переключения ответвлений выполняются вручную не чаще одного-двух раз в сезон. Подстанции, питаемые от сети 110 кВ, оснащены более простыми устройствами ПБВ с диапазоном $\pm 2 \times 2,5 \% = \pm 5 \%$, которые оказываются вполне достаточными для большинства режимов работы.

Данное наблюдение отражает фундаментальную инженерную реальность: широкий допустимый диапазон напряжений контактной сети (19,5–29,5 кВ, т.е. $\pm 18 \%$ от номинала 25 кВ) означает, что вторичное напряжение тяговой подстанции достаточно поддерживать лишь в сравнительно узком диапазоне 27,5–29,5 кВ. Учитывая, что потери напряжения в питающей линии контактной сети редко превышают 7 кВ даже при максимальной нагрузке, данное требование выполняется без непрерывного динамического регулирования в большинстве случаев.

Отсюда следует, что капиталовложения в сложные трансформаторы с РПН с полной функцией автоматического регулирования напряжения не оправданы для большинства тяговых подстанций КТЖ с точки зрения качества электроэнергии. Замена РПН устройствами ПБВ позволит снизить стоимость приобретения трансформатора на 15–20 %, сократить потребность в техническом обслуживании и повысить надёжность трансформатора за счёт исключения наиболее ненадёжного механического узла. Исключение составляют подстанции, питающие особо протяжённые зоны (>25 км) или тяжёлые профильные участки ($>6\%$).

Батареи конденсаторов, устанавливаемые на постах секционирования и шинах 27,5 кВ тяговых подстанций, выполняют двойную функцию: компенсацию реактивной мощности (улучшение профиля напряжения) и фильтрацию гармоник. В типовой схеме батарея конденсаторов включается последовательно с фильтровым реактором, образуя фильтр последовательного резонанса, настроенный на доминирующий порядок гармоники. Для фильтра, настроенного на 3-ю гармонику, условие последовательного резонанса:

$$n_{res} = \sqrt{\frac{Q_C}{Q_L}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (7)$$

Для фильтра 3-й гармоники $n_{res} = 2,8\text{--}2,9$ (расстройка для избежания точного резонанса), что требует $Q_P / Q_K \approx 0,12\text{--}0,13$. Мощность компенсации рассчитывается как 1 МВАр на 1 кВ требуемого повышения напряжения на конце питающей линии. При типичном дефиците напряжения 2–4 кВ на каждом посту секционирования необходима батарея конденсаторов мощностью 2–4 МВАр.

Результаты натурных испытаний на участке Астана–Атбасар подтверждают, что батарея конденсаторов 2 МВАр на посту секционирования повышает напряжение на конце

питающей линии на 1,8–2,2 кВ в нормальном режиме движения и снижает THD_U на 1,2–1,8 процентных пункта за счёт фильтрации 3-й гармоники. Ключевое эксплуатационное преимущество — простота: батарея может оставаться подключённой даже при отсутствии поездов, поскольку результирующее повышение напряжения не превышает 29,5 кВ.

Таблица 2 – Сравнительная оценка технологий компенсации реактивной мощности для СТЭ КТЖ

Технология	Тип регулирования	Время отклика	Фильтрация гармоник	Относит. стоимость	Интеграция SCADA
Фиксированная конд. батарея	Нет (фиксир.)	N/A	Пассивная (настр.)	1,0×	Базовая
Коммутируемая конд. батарея	Ступенчатое	Циклы–секунды	Пассивная (настр.)	1,8×	Умеренная
SVC-TSC	Ступенчатое (быстрое)	<50 мс	Пасс. + актив.	3,5×	Полная
SVC-TCR	Непрерывное	<50 мс	Активная	4,0×	Полная
Насыщ. реактор (ФР-тип)	Непрерывное	<200 мс	Пассивная (настр.)	1,5×	Полная
STATCOM (VSC)	Непрерывное	<10 мс	Активная (полная)	6,0×	Полная
Трансф. с РПН (OLTC)	Ступенчатое (медленное)	10–60 с	Нет	2,0×	Умеренная

Фиксированные и коммутируемые батареи конденсаторов с фильтрами гармоник представляют наиболее экономически эффективное решение на уровне 27,5 кВ. Насыщающиеся реакторы феррорезонансного типа обеспечивают оптимальное сочетание возможности плавного регулирования, приемлемой стоимости, совместимости с SCADA и помехоустойчивости при компенсации зарядной реактивной мощности на уровне 220 кВ. Решения СТАТКОМ или СТК-ТРН технически превосходят другие варианты, однако экономически оправданы лишь на участках с экстремальной изменчивостью реактивной мощности, например на выделенных скоростных пассажирских линиях.

Шунтирующие реакторы, устанавливаемые на шинах высокого напряжения (220 кВ) тяговых подстанций, являются традиционным средством компенсации избыточной зарядной реактивной мощности в режиме малых нагрузок. Суммарная требуемая мощность шунтирующих реакторов:

$$Q_{ШР} = Q_{3,\Sigma} - Q_{тяг, \min} \quad (8)$$

Для участка Шу–Алматы (290 км, $Q_3 \approx 39,9$ МВАр) при минимальном тяговом потреблении реактивной мощности 5–8 МВАр (ночной режим лёгкого движения) требуемая мощность шунтирующих реакторов составляет около 30–35 МВАр. С использованием стандартных агрегатов по 3,3 МВАр необходимо 9–11 единиц, распределённых на 2–3 промежуточных подстанциях. Расчёты подтверждают, что при равномерном распределении 9–10 агрегатов по линии отклонение напряжения на шинах всех подстанций остаётся в пределах $\pm 5\%$ от номинала как при минимальной, так и при максимальной нагрузке.

Среди всех непрерывно управляемых устройств регулирования реактивной мощности феррорезонансные реакторы насыщения (РН) с обмоткой подмагничивания постоянным током наиболее целесообразны для СТЭ КТЖ по следующим техническим причинам: (1) плавное непрерывное регулирование от нуля до номинального потребления реактивной мощности; (2) собственная помехоустойчивость к железнодорожным электромагнитным помехам; (3) возможность изготовления с использованием существующей промышленной базы, что обеспечивает отечественное производство; (4) совместимость с автоматическим ПЛК-управлением через стандартные интерфейсы

SCADA; (5) возможность двухрежимной работы — как автономного шунтирующего реактора, так и плавного регулятора при параллельном включении с батареями конденсаторов (Степанов Егоров, Соколова, 2021: 34–41).

Алгоритм управления регулированием реактивной мощности на базе РН:

$$I_{\text{ПМ}} = f(U_{\text{ВН}} - U_{\text{уст}}, \Delta Q_{\text{ош}}) \quad (9)$$

где $I_{\text{ПМ}}$ — ток подмагничивания [А]; $U_{\text{ВН}}$ — измеренное напряжение на шинах ВН [кВ]; $U_{\text{уст}}$ — уставка напряжения [кВ]; $\Delta Q_{\text{ош}}$ — отклонение реактивной мощности от целевого баланса [МВАр]. Функция f представляет собой пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования с защитой от насыщения, реализуемый в любом стандартном ПЛК, совместимом с МЭК 61131-3.

Обсуждение.

Результаты настоящего исследования ведут к ряду ключевых инженерных выводов, заслуживающих обсуждения в более широком контексте современного развития систем электроснабжения железных дорог.

Выявленный факт эксплуатации трансформаторов с РПН на большинстве тяговых подстанций КТЖ в режиме фиксированного ответвления или сезонного переключения ставит под сомнение сложившуюся практику проектирования, предусматривающую полную функцию РПН для всех тяговых подстанций как стандартное требование. Экономический аргумент в пользу упрощения весом: если устройства ПБВ с ручной сезонной подстройкой оказываются достаточными для 80–85% подстанций, полученная экономия может быть направлена на более приоритетную задачу — установку компенсирующих устройств на постах секционирования и компенсацию зарядной мощности на внешних линиях электроснабжения.

Аргументы в пользу интеграции управления компенсацией реактивной мощности в SCADA заслуживают особого внимания в контексте программы модернизации железных дорог Казахстана. Современные архитектуры SCADA для железнодорожного электроснабжения обеспечивают прямое прогностическое управление компенсирующими устройствами на основе данных о местоположении поездов от централизованной системы управления движением, а не чисто реактивное управление по обратной связи от измерения напряжения. По данным расчётного моделирования, такой подход снижает амплитуду отклонений напряжения на 30–50 % по сравнению с чисто реактивным управлением (Ye et al., 2022: 1–12).

Применение технологии цифрового двойника открывает особенно перспективный путь к оптимизации реактивной мощности (Nallaperuma et al., 2020: 2024). Цифровой двойник СТЭ, непрерывно обновляемый результатами измерений интеллектуальных датчиков на подстанциях и постах секционирования, может служить вычислительным ядром алгоритма оптимального потокораспределения, определяющего оптимальные уставки тока подмагничивания РН и программу включения батарей конденсаторов на прогнозируемый горизонт 1–2 часа. Этот подход соответствует стандарту МЭК 61968/61970 «Общая информационная модель» и стандарту МЭК 62439-3 для высоконадёжных коммуникаций в промышленной автоматизации.

Экологическое и энергосберегающее измерение управления реактивной мощностью также существенно. При повышении коэффициента мощности с 0,82 до 0,95 за счёт реактивной компенсации активные потери мощности снижаются приблизительно на 25 %, что в масштабах электрифицированной сети КТЖ выражается в экономии нескольких десятков ГВт·ч в год — весомый вклад в достижение целей Казахстана по энергоэффективности в рамках национальной программы перехода к «зелёной» экономике.

Заключение.

В настоящей статье представлен комплексный анализ регулирования напряжения и управления реактивной мощностью в СТЭ электрифицированных железных дорог Казахстана с акцентом на пять участков КТЖ, питаемых от сети 220 кВ. Основные выводы и рекомендации состоят в следующем. Зарядная реактивная мощность протяжённых линий 220 кВ (157,8–405 км) составляет 21,7–55,7 МВАр, что подтверждает необходимость специализированных мер компенсации зарядной мощности для всех участков КТЖ с длиной линии более 150 км. Потери напряжения в питающих линиях контактной сети в нормальном и напряжённом режимах движения (2–7 кВ) остаются в допустимом диапазоне 19,5–29,5 кВ для всех проанализированных конфигураций при условии поддержания вторичного напряжения тяговой подстанции на уровне 27,5–29,5 кВ. Фиксированные батареи конденсаторов 2–4 МВАр на постах секционирования обеспечивают достаточную поддержку напряжения с дополнительным эффектом фильтрации гармоник. Эксплуатационный факт отключения автоматики РПН на большинстве подстанций КТЖ даёт весомые основания для замены РПН более простыми и надёжными трансформаторами с ПБВ при новых установках и плановых капитальных ремонтах, что позволит снизить стоимость трансформатора на 15–20% и повысить надёжность. Феррорезонансные реакторы насыщения с обмоткой подмагничивания постоянным током представляют собой оптимальную непрерывно регулирующую компенсирующую технологию для условий КТЖ, сочетающую плавное регулирование реактивной мощности, высокую электромагнитную помехоустойчивость, возможность отечественного производства и полную совместимость с ПЛК-управлением на базе SCADA. Интеграция управления компенсацией реактивной мощности с прогностическим управлением SCADA на основе графика движения поездов — с использованием цифровых двойников, IoT-сетей датчиков и ПЛК, совместимых с МЭК 61131-3, — определена как стратегическое направление дальнейшего развития инфраструктуры тягового электроснабжения железных дорог Казахстана в соответствии со стандартами «Индустрии 4.0». Расчётная экономия энергии от полного внедрения оптимизации реактивной мощности составляет 20–30 ГВт·ч в год по электрифицированной сети КТЖ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку и испытание предложенного алгоритма регулирования реактивной мощности на базе РН в реальных условиях эксплуатации КТЖ, верификацию цифрового двойника СТЭ по данным натурных измерений, а также технико-экономическую оптимизацию размещения компенсирующих устройств с учётом прогнозируемого роста объёмов перевозок.

REFERENCES

- Dvorovchikova T.V., Zimakova A.N. (1990). *Elektrosnabzhenie i kontaktnaya set elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Posobie po proektirovaniyu* [Power Supply and Contact Network of Electrified Railways. Design Guide]. — М.: Transport. — 336 p. [In Russ.]
- Faiz J., Ghazizadeh M., Hekmat M. (2021). Reactive power compensation strategies in railway traction systems: A comprehensive review // *IET Power Electronics*. — Vol. 14. — No. 10. — Pp. 1597–1617. DOI: 10.1049/pel2.12106 [In Eng.]
- Grinberg-Basin M.M. (1988). *Tyagovye podstantsii. Posobie po proektirovaniyu* [Traction Substations. Design Guide]. — М.: Transport. — 312 p. [In Russ.]
- Ilyushin P.V., Suslov K.V. (2019). Smart power supply systems for remote consumers // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — Vladivostok, — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934009 [In Eng.]
- Lü M., Liu W., Wang C., Chen J. Reactive power compensation in high-speed railway traction power supply system: A review // *Energies*. — Vol. 16. — No. 3. — P. 1193. DOI: 10.3390/en16031193 [In Eng.]
- Mamoshin R.R., Zimakova A.N. (1991). *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power Supply of Electrified Railways]. — М.: Transport. — 368 p. [In Russ.]
- Markvardt K.G. (ed.). (1982–1983). *Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog* [Handbook of Railway Power Supply]. Vol. 1–2. — М.: Transport. [In Russ.]
- Markvardt K.G. (1989). *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power Supply of Electrified Railways]. — М.: Transport. — 456 p. [In Russ.]
- Nallaperuma S., De Silva C., Abeysinghe S., Bhatt M., Perera S. (2020). Artificial intelligence based techniques for railway systems — A review // *Electronics*. — Vol. 9. — No. 12. — P. 2024. DOI: 10.3390/electronics9122024 [In Eng.]

Rosen V.P., Sokhina Y.V., Zubkova M.V. (2022). Harmonic distortion analysis in AC railway traction systems // 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies — Asia (ISGT Asia). — Singapore. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ISGTAsia54193.2022 [In Eng.]

Stepanov A.S., Egorov A.V., Sokolova O.I. (2021). Experimental performance of a ferroresonance-controlled shunt reactor at a traction substation // Elektrotehnika [Electrical Engineering]. — No. 4. — Pp. 34–41. [In Russ.]

Suslov K.V., Solonina N.N., Smirnov A.S. (2022). Distributed power quality monitoring in railway traction grids using IoT technologies // IEEE Access. — Vol. 10. — Pp. 49612–49621. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173018 [In Eng.]

Varetsky Yu., Ostroverkhov M., Mazur D. (2020). Harmonic pollution of railway traction systems and its impact on power supply quality // Energetika. — Vol. 66. — No. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.6001/energetika.v66i1.4232 [In Eng.]

Ye X., Kennedy J., McGordon A., Barreras J.V. (2022). Digital twin framework for rail traction power supply simulation and optimisation // IET Electrical Systems in Transportation. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.1049/els2.12039 [In Eng.]

Zhang Z., Pang H., Georgiadis A., Cecati C. (2019). Wireless power transfer — an overview // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — Vol. 66. — No. 2. — Pp. 1044–1058. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835378 [In Eng.]