

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

Научная статья

УДК 621.331.3.025.1

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-3-19

Алсултан Мохаммед Джафар Джасим

Российский Университет Транспорта

\*E-mail: 1144648@edu.rut-miit.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ: ГЛУБОКИЙ АНАЛИЗ



### Информация о статье

Поступила:

14 июля 2023 г.

Одобрена после  
рецензирования:

15 августа 2023 г.

Принята к печати:

01 сентября 2023 г.

Опубликована:

12 сентября 2023 г.

### Ключевые слова:

Система кофазного соединения, компенсация гармоник и дисбаланса, силовые электронные преобразователи, качество электроэнергии, электрификация железных дорог

### Аннотация.

С момента начала электрификации железных дорог проблемы качества электроэнергии были основной проблемой в железнодорожных сетях из-за их особых характеристик. За историю электрификации железных дорог было исследовано и применено множество способов улучшения качества электроэнергии в системах переменного и постоянного тока для тягового электроснабжения. В данной статье представлен обзор проблем качества электроэнергии в процессе развития электрификации железных дорог и исследуется необходимость качества электроэнергии и требования к системам для обеспечения соответствующего качества электроэнергии. Рассматриваются и сравниваются стратегии компенсации. Целью является предоставление комплексного обзора проблемы качества электроэнергии в сетях железнодорожного электропитания/распределения для исследователей и инженеров, работающих в области электрификации железных дорог.

**Для цитирования:** Алсултан Мохаммед Джафар Джасим. Исследование проблем качества электроэнергии в электрификации железных дорог: Глубокий анализ // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 4 (168). С. 3-19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-3-19, EDN: КННКСУ

Электрификация железных дорог началась в начале XX века. Она была принята многими странами из-за своих преимуществ, таких как снижение загрязнения воздуха, возможность перевозки больших грузов и массового транспорта, высокая эффективность и, недавно, снижение выбросов CO<sub>2</sub>. С самого начала электрификации железных дорог качество электроэнергии являлось значительной проблемой для сторонников электрификации, и множество исследований было посвящено улучше-

нию качества электроэнергии в железнодорожных распределительных системах [1].

В данной статье приводятся и систематизируются наиболее значимые исследования по улучшению качества электроэнергии в сетях электрифицированных железных дорог с целью обеспечить их доступность для исследователей. Сначала освещаются проблемы, связанные с качеством электроэнергии в железнодорожных системах. Одной из основных проблем в случае трехфазных систем

является дисбаланс тока, поскольку современная железнодорожная нагрузка всегда представляет собой однофазную нагрузку, что приводит к возникновению составляющей тока отрицательной последовательности, равной составляющей тока положительной последовательности [2].

В прошлом использовались однофазные коллекторные двигатели, но в последние 50 лет однофазные выпрямители/трехфазные инверторы стали применяться в сочетании с трехфазными синхронными или асинхронными машинами (двигателями/генераторами). При регенерации энергии во время торможения выпрямитель преобразуется в инвертор, а инвертор в выпрямитель, таким образом, энергия возвращается в однофазную энергосистему [3,4].

Наиболее важные системы, затронутые электрификацией железных дорог, включают в себя сети электропитания, железнодорожные сигнализации и связь, а также телекоммуникационные системы [5,6].

Исследователи, занимающиеся проблемами качества электроэнергии, уделяют значительные усилия изучению этих проблем и поиску возможных улучшений системы для их решения. Качество электроэнергии может охватывать широкий спектр параметров, таких как флуктуации напряжения, дисбаланс напряжения и тока, гармоники, реактивная мощность и другие. В железнодорожной отрасли особенно проблемными являются такие аспекты качества электроэнергии, как текущая составляющая отрицательной последовательности (NSC), гармоники тока и реактивная мощность, о которых будет подробнее рассказано в следующих разделах. Существуют два классических подхода к решению проблем качества электроэнергии: разработка системы с меньшим количеством проблем и большей гибкостью или улучшение качества электроэнергии в системе с помощью стратегий компенсации. Научные статьи по качеству электроэнергии в электрифицированных железнодорожных сетях можно разделить на две основные категории. В первую очередь рассматриваются статьи, описывающие моделирование системы, измерение, анализ и расчет параметров системы [7-13].

Во-вторых, рассматриваются статьи, посвященные улучшению и компенсации качества электроэнергии в отношении гармоник текущих составляющих отрицательной последовательности и совместной компенсации гармоник текущих составляющих отрицательной последовательности и реактивной мощности, для чего было исследовано и предложено множество различных подходов. Кроме того, представлен всесторонний обзор технологий активных фильтров и рассмотрены преобразователи переменного/постоянного тока для улучшения качества электроэнергии, которые могут служить основой для улучшения качества электроэнергии в системах электрифицированных железных

дорог [14 – 18].

В данной классификации методов компенсации в контексте развития электрификации железных дорог стратегии организованы в соответствии с основными принципами. Вначале описываются стратегии компенсации, учитывая конфигурацию системы, затем классификация, основанная на типе электропитания, иллюстрируя типы соединений в тяговых подстанциях (ТПС), от сбалансированных трехфазных до однофазных трансформаторов. В конце рассматриваются наиболее эффективные и коммерчески доступные компенсаторы, а также обсуждаются важные методы компенсации [19 – 21].

Для электрифицированных железных дорог улучшение качества электроэнергии на стороне нагрузки (приводной системы) недостаточно, поскольку тяговая нагрузка по своей природе имеет низкое качество электроэнергии. Поэтому активные методы компенсации на основе силовой электроники широко используются [22, 23].

В данной статье представлен обзор проблем качества электроэнергии, возникших в ходе развития электрических железных дорог, и исследуются различные подходы, использовавшиеся для решения этих проблем на протяжении всей их истории.

#### Анализ качества электроэнергии на электрифицированных железных дорогах

Нагрузка на тягу динамически изменяется, и могут возникать дуги из-за взаимодействия токоприемника/контактной сети и коммутационных операций. Современные приводы основаны на применении силовых электронных преобразователей в сочетании с трансформаторами, что обеспечивает незначительное внесение гармоник тока в систему питания, как показано на Рис. 1. Большим преимуществом такого подхода является возможность движения поездов через границы стран с различными железнодорожными системами электропитания, имеющими различные напряжение и частоту [24,25].

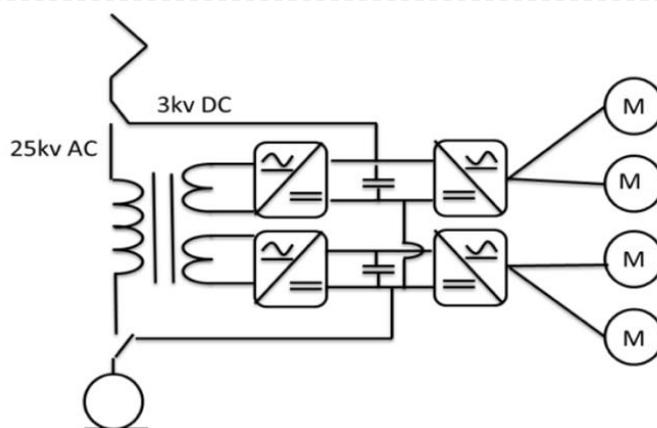


Рис. 1. Современная приводная система локомотива состоит из трехфазного инвертора с ШИМ (PWM) и трехфазной асинхронно-синхронной машины с двумя режимами напряжения  
Fig. 1. A modern locomotive drive system consists of a three-phase PWM inverter and a three-phase two-voltage asynchronous-synchronous machine

### А. Дисбаланс системы

Дисбаланс системы представляет собой одну из наиболее серьезных проблем в качестве электроэнергии железнодорожных систем, поскольку большинство поездов работает с однофазной нагрузкой, которая порождает текущую составляющую отрицательной последовательности (NSC), равную текущей составляющей положительной последовательности (PSC). Если эти текущие составляющие отрицательной последовательности не подавляются, отношение текущей составляющей отрицательной последовательности к текущей составляющей положительной последовательности составляет 1, и, поскольку тяговая нагрузка является значительной (например, 5-20 МВт), она может нанести вред электроэнергетической системе и требует компенсации [5 – 8].

В статье [11] исследуется метод сдвига фазы, который является наиболее применимым для компенсации текущей составляющей отрицательной последовательности (NSC). В данной статье представлено подробное рассмотрение данного метода, включая подробное описание подключений подстанций, которое представлено в разделе IV.

Компенсация текущей составляющей отрицательной последовательности (NSC) с помощью специально подключенных трансформаторов изучается в [19 – 23]. В электроэнергетической промышленности применяются обычные трансформаторы с подключениями типа «дельта» и «треугольник», в то время как в специальных отраслях, таких как электрификация железных дорог, используются иные типы подключений, такие как «В-В», «Скотт», «Универсальный сбалансированный трансформатор» (MPB) и другие. Следует отметить, что массовое производство обычных трансформаторов приводит к снижению стоимости, однако специальные трансформаторы обладают лучшей производительностью в данном случае. В некоторых публикациях [14 – 18] для компенсации текущей составляющей отрицательной последовательности (NSC) используются различные типы статических напряженных компенсаторов (SVC). Среди таких компенсаторов можно назвать фиксированные конденсаторы с тиратронным управляемым реактором (FC/TCR) или тиратронные коммутационные конденсаторы (TSC). В публикациях [14,18] исследуются наиболее новые коммерческие компенсаторы, предназначенные для применения в железнодорожных системах. Они включают один или два обратно-параллельно подключенных преобразователя для компенсации общего неактивного тока. В железнодорожных нагрузках обычно не применяется последовательная компенсация, чтобы избежать дисбаланса тока в точке общего подключения (PCC), так как это может вызвать проблемы с напряжением.

### В. Гармоники

В городских постоянных тяговых системах с использованием 12-пульсовых выпрямителей генерируются значительные объемы 11-го и 13-го гармоник, а в переменных тяговых системах поезда используют преобразователи переменного/

постоянного/переменного тока, что приводит к появлению различных гармоник в трехфазной системе питания. Кроме того, в систему переменного тока может быть внесена постоянная составляющая, исследованная в [26].

Токовые и напряженные гармоники, изучаемые в [15, 16, 22], являются второй проблемой качества электроэнергии в электрических приводах железных дорог, которую необходимо компенсировать. В [27] исследуются и моделируются гармоники, генерируемые тяговой нагрузкой, а в [15, 16, 22] предлагаются и изучаются методы компенсации для снижения или устранения гармоник. Доказано, что специально подключенные трансформаторы действуют как пассивные фильтры, эффективно снижая гармоники в зависимости от типа трансформатора и порядка гармоник, что подтверждается исследованиями, такими как [16 – 18].

Одним из применимых методов снижения гармоник является управление преобразователями переменного/постоянного/переменного тока, используемыми в приводах тяговых двигателей поезда [4, 15, 22], что приводит к уменьшению гармонических искажений. В [18] предложено использование чистого 27-уровневого четырехквadrантного преобразователя в Тяговой Подстанции (TSS) в системах постоянного тока, а в [19] исследуется семиуровневый преобразователь, который эффективно снижает гармоники на первичной стороне TSS.

Пассивные фильтры являются классическим методом снижения гармоник. Шунтовые активные фильтры являются наиболее эффективным методом для подавления гармоник, но они также являются более дорогостоящими. Поэтому, в случае чувствительных систем или при близости к чувствительным нагрузкам активные фильтры могут быть хорошим выбором. Некоторые исследования, такие как [15, 16, 22], предлагают комбинации активных и пассивных фильтров, где пассивные фильтры используются для снижения нагрузки на активные фильтры. Кроме того, в [28] исследуются методы компенсации низкочастотного гармонического тока, потребляемого вспомогательными источниками питания поезда.

### С. Реактивная мощность

Современные преобразователи переменного тока, используемые в тяговых двигателях, применяют метод модуляции ширины импульсов (PWM), что приводит к минимальной генерации реактивной мощности. Также компенсаторы качества электроэнергии стремятся к коэффициенту мощности, равному 1 [29, 30, 31].

В Тяговых Подстанциях (TSS) требуется генерация/передача реактивной/активной мощности для компенсации составляющих отрицательной последовательности (NSC). Следовательно, NSC в TSS должны быть в противофазе с трехфазными токами/напряжениями для устранения реактивной мощности. Таким образом, компенсация реактивной мощности и NSC проводится одновременно и не рассматривается как отдельные процессы.

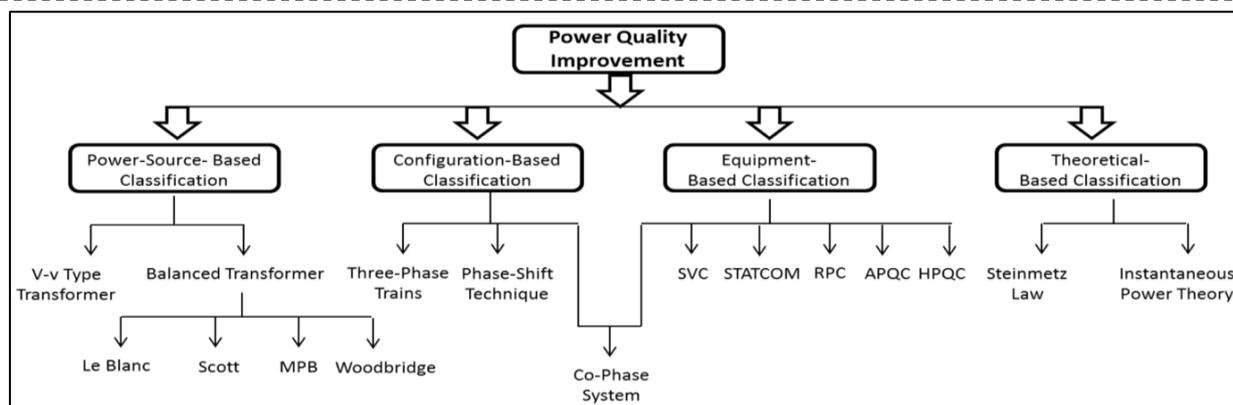


Рис. 2. Классификация стратегий улучшения качества электроэнергии  
 Fig. 2. Classification of Power Quality Improvement Strategies

#### Д. Проблемы с напряжением

Наиболее частыми проблемами, связанными с напряжением, являются проблемы с его величиной. Как отмечалось ранее, несбалансированные токи приводят к несбалансированным напряжениям. Тяговые двигатели и другие нагрузки, связанные с поездами, спроектированы для правильной работы при пониженной амплитуде напряжения на 24% или повышенной амплитуде на 10% от номинального напряжения электрических приводов железнодорожных систем в соответствии с IEC 6850 и EN 50163. Поэтому проблемы с токами, о которых будет рассказано далее, требуют особого внимания, в то время как проблемы с напряжением не оказывают негативного влияния на работу системы.

#### Образование дуги

Взаимодействие между pantograph/catenary системы верхней подвески или между щетками и третьей или четвертой рельсой вызывает образование дуг из-за динамической широтной свободы между колесами и рельсами [5,6]. В частности, на изоляторах систем верхней подвески или на склонах третьей/четвертой рельсы могут возникать дуги, которые могут исказить напряжения и токи, а также создавать переходные постоянные составляющие в системах переменного тока, что может привести к разрушению диэлектриков.

#### III. Опасности Проблем Качества Электроэнергии

Снижение качества электроэнергии в железнодорожных системах может привести к сбоям соседних систем. Самая важная опасность, связанная с проблемами качества электроэнергии, возникает в верхней подстанции питания, которая может понести серьезный ущерб, как будет рассмотрено далее. Кроме того, это может повлиять на работу сигнально-коммуникационных систем железной дороги.

Влияние низкого качества электроэнергии в тяговых системах на другие системы описывается в работе [5,6,22,24], и наиболее значимыми опасностями являются:

#### А. Влияние на сигнализацию и связь

Трековые цепи спроектированы для работы на определенной частоте, которая не должна подвергаться воздействию силовой частоты. Однако в присутствии гармоник коммуникационные сигналы могут быть затронуты гармоническими частотами

[5, 6], это приводит к неправильным сигналам и неправильному позиционированию поездов, что может привести к катастрофе.

Коммуникационные кабели обычно располагаются параллельно силовым кабелям. При наличии рассеянных токов ток катанарной системы и обратный ток становятся неравными, вызывая ненулевое магнитное поле в коммуникационных кабелях. В результате возникают напряжения в коммуникационных кабелях, что влияет на коммуникационные сигналы [6]. Кроме того, высшие гармоники могут вызвать помехи между коммуникационной и силовой системами.

#### В. Влияние на верхнюю сеть

Влияние проблем с качеством электропитания на верхнюю сеть исследуется во многих публикациях [5,6] и может быть разделено на три основных влияния:

##### 1. Снижение коэффициента использования

Поскольку тяговая нагрузка является большой однофазной нагрузкой, это приводит к высокому току в двух фазах, что снижает коэффициент использования линии передачи [22].

##### 2. Неправильная работа защитной системы

Реле защиты могут работать неправильно в присутствии гармоник и NSC-токов, и напряжений. Тяговая нагрузка вводит большое количество гармоник и NSC, что приводит к неправильной работе защитной системы.

##### 3. Неправильная работа систем управления линиями передачи

Выборки напряжения и тока основаны на основных компонентах напряжения или тока. Каждая система управления в линии передачи будет работать неправильно, поскольку тяговая нагрузка вводит большое количество гармоник и NSC-тока в линии передачи.

#### IV. Методы улучшения качества электропитания

С самого начала электрификации железнодорожного транспорта были исследованы и применены различные методы компенсации в системах железных дорог. Дополнительные статьи, посвященные стратегиям компенсации тяговых нагрузок, были рассмотрены и классифицированы на основе четырех основных концепций, изображенных на Рис. 2.

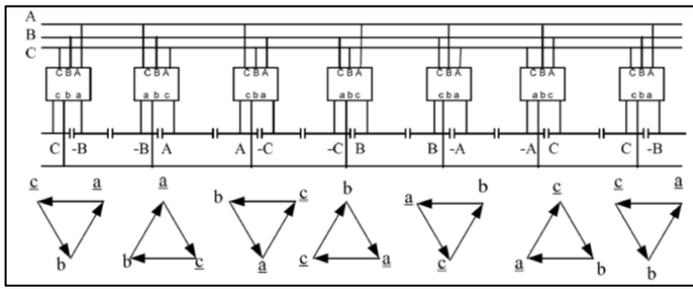


Рис. 3. Метод сдвига фаз в 7 смежных ТП с трансформаторами типа Yd11 и Yd5; где каждый участок разделяется двумя изоляторами участка; каждые три смежные соединения трансформаторов спроектированы таким образом, чтобы создавать NSC с разностью фаз в 120 градусов, где NSC будет равно нулю для каждой трех тяговых подстанций

Fig. 3. Phase shift method in 7 adjacent transformer substations with Yd11 and Yd5 type transformers; where each section is separated by two section insulators; every three adjacent transformer connections are designed to create an NSC with a phase difference of 120 degrees, where NSC will be zero for every three traction substations

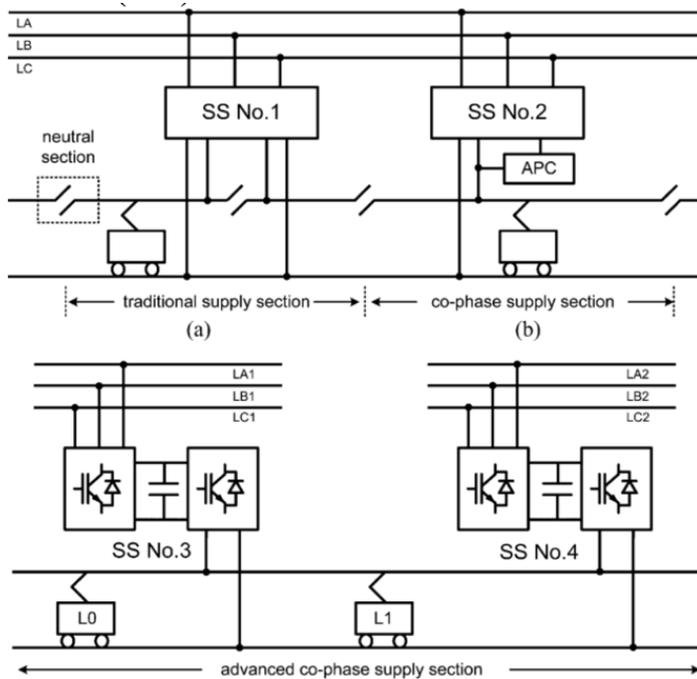


Рис. 4. Расширенная система кофазного сравнена с кофазной системой и традиционной системой питания [32]

Fig. 4. The extended cophasic system is compared with the cophasic system and the traditional feeding system [32]

#### А. Классификация на основе конфигурации

В первые десятилетия 20-го века некоторые страны, такие как Италия, США и Швейцария, разработали трехфазные поезда с целью достижения симметричной трехфазной нагрузки. Это включало использование двух пантографов для двух фаз и рельсов в качестве третьей фазы. Длина нейтрального участка (NSC) в этой системе была очень маленькой. Однако использование второго пантографа и электрификация наземных рельсов были двумя серьезными недостатками, что привело к отказу инженеров от такого подхода.

По мере развития однофазных поездов был применен метод фазового сдвига в системах тяги.

Этот метод предполагал подключение трех смежных подстанций тяги (TSSs) между двумя разными фазами в исходной сети, компенсируя основную длину нейтрального участка в общей системе [11]. На Рис. 3 показана техника фазового сдвига для треугольник-звезда TSSs.

Этот метод эффективно компенсирует основной ток нейтрального участка только в случае, если нагрузки в каждом участке равны. Однако в асимметричной системе (например, при низком трафике или на коротких участках) проблемой остается нейтральный участок. Некоторые европейские страны используют большие однофазные синхронные генераторы (например, мощностью 140 МВт) с частотой 16 2/3 Гц на электростанции Некарвестхайм в Германии, где нейтральный участок ослабляется внутри генератора и требуется система подавления (например, обмотка с демпфером на роторе). В качестве альтернативы улучшение качества электроэнергии на железных дорогах в основном осуществляется за счет компенсации оборудования, такого как статические компенсаторы реактивной мощности (static VAR compensators), статические синхронные компенсаторы (STATCOM) и железнодорожные статические силовые устройства (railway static power conditioner – RPC).

В последнее время исследователи применяют методы компенсации на основе оборудования и конфигурации для формирования кофазной цепи, как показано на Рис. 4. Этот подход эффективно снижает различные проблемы качества электроэнергии [6, 32, 33, 34].

Однако кофазная система по-прежнему считается технологией, находящейся в стадии разработки, и исследователи продолжают работать над ее улучшением. В этом методе возвратная цепь (то есть наземные рельсы) подключается к одной фазе трехфазной системы питания, а контактная проводка питается двумя другими фазами через активный компенсатор мощности (APC), как показано на Рис. 4(b). Такая схема обеспечивает деление мощности между фазами, что приводит к симметричным токам на первичной стороне. Кроме того, она позволяет одновременно компенсировать дисбаланс тока, гармоники и реактивную мощность. Дополнительным преимуществом кофазной системы является отсутствие секционных изоляторов в подстанциях тяги (TSSs). Это важный аспект для высокоскоростных поездов, поскольку секционные изоляторы ограничивают профиль скорости движения поезда. Это может быть сильным аргументом в пользу использования кофазной системы на высокоскоростных линиях.

## В. Классификация на основе источника питания

Трансформатор типа «Дельта-звезда» является наиболее распространенным в энергетической отрасли. Однако в случае применения в системах тяги он создает нейтральный участок (NSC), составляющий от 50% до 100% от длины фазового участка (PSC). С другой стороны, трансформатор типа «V-V» имеет аналогичные возможности компенсации NSC, при этом требуя на одну обмотку меньше по сравнению с трансформатором «Дельта-звезда». Кроме того, коэффициент использования при полной нагрузке для трансформатора с соединением «V-V» может достигать 100%, в то время как для трансформатора с соединением «Дельта-звезда» он составляет 75,6%, для трансформатора Скотта – 81,6%, для трансформатора Ле Блана – 84,5% и для трансформатора Вудбриджа – 82,6%. Эти преимущества трансформатора «V-V» привели к широкому его применению среди проектировщиков, особенно в случае высокоскоростных поездов, требующих высокоомощных подстанций тяги [20, 21].

Специальные соединенные трансформаторы, такие как Скотта, Ле Блан, трансформаторы с соответствующим импедансом, были разработаны и внедрены в коммерческие приложения за последние десятилетия. Они преобразуют ортогональную двухфазную систему в симметричную трехфазную и могут обеспечивать симметричную нагрузку на участки тяговой линии в первичной обмотке трансформаторов. Система тяги может быть питаема различными схемами подключения, которые исследуются в [19 – 21] для систем переменного и постоянного тока. Ток нейтрального участка (NSC) для однофазных, V-V, Скотта, Ле Блана, модифицированного Вудбриджа и «Дельта-звезда» трансформаторов рассчитывается в [21], а в [35] Скотт и Ле Блан трансформаторы сравниваются с точки зрения несбалансированности напряжения. Эти различные схемы подключения в подстанциях тяги ведут себя по-разному в зависимости от коэффициента мощности нагрузки; в [36] представлено сравнение этих трансформаторов с использованием различных определений коэффициента мощности. Также в случае систем постоянного тока в железнодорожных системах существуют различные варианты подключения подстанции тяги, которые влияют на показатели качества электроэнергии, примеры которых приведены в [37]. Эти так называемые сбалансированные трансформаторы не имеют фундаментального нейтрального участка, если нагрузки различных участков по линии равны. Они полезны для линий с высокой интенсивностью движения, но в случае низкой интен-

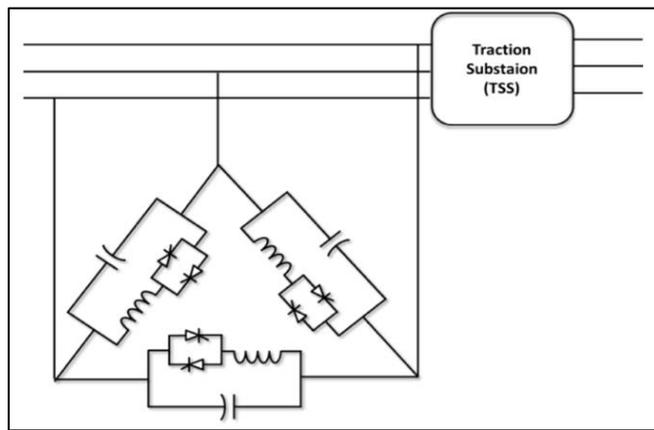


Рис. 5. Подключение статического компенсатора реактивной мощности (Static Var Compensator, SVC) к системе, включая фиксированные конденсаторы и тиристорно-управляемые реакторы (FC/TCR)

Fig. 5. Connecting a Static Var Compensator (SVC) to the system, including fixed capacitors and thyristor controlled reactors (FC/TCR)

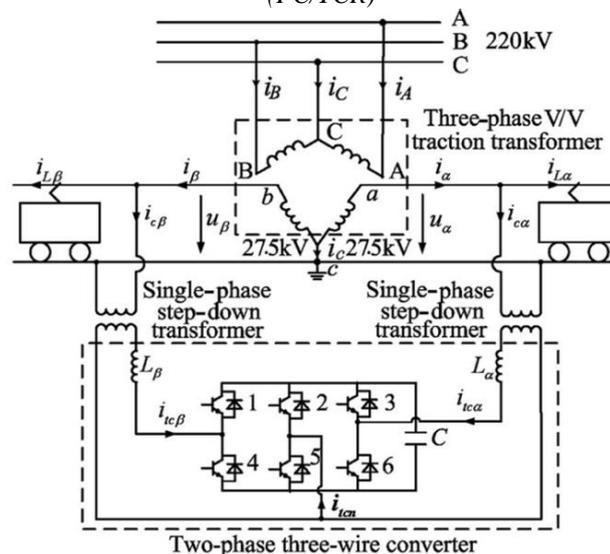


Рис. 6. Подключение автоматического преобразователя постоянного напряжения (Automatic Power Quality Compensator, APQC) к тяговой подстанции типа V-v [42]

Fig.6. Connecting an Automatic Power Quality Compensator (APQC) to a V-v traction substation [42]

сивности движения нейтральный участок будет существовать.

Это привело проектировщиков к использованию компенсации нейтрального участка на основе оборудования с использованием активных методов для компенсации NSC в установившемся и динамическом режимах работы.

## С. Классификация на основе оборудования

Существует различное электрооборудование, используемое для улучшения проблем качества электроэнергии, такое как пассивные и активные фильтры, применяемые для устранения гармоник. Статический компенсатор реактивной мощности (SVC) используется для компенсации нейтрального участка (NSC) и реактивной мощности. Железнодорожное статическое силовое устройство (RPC), активный компенсатор качества электроэнергии (APQC) и гибридное силовое устройство качества

электроэнергии (HPQC) компенсируют как ток NSC, так и реактивную мощность, а также выполняют устранение гармоник.

SVC, изображенный на Рис. 5, широко используется в течение последних десятилетий для компенсации NSC благодаря своей простоте применения и низкой стоимости по сравнению с другими активными компенсаторами [17, 19, 38, 39]. Компенсация NSC при помощи SVC на основе закона Штейнметца и стратегии управления исследуется в [38] для двухфазной железнодорожной системы и в [40] для общей компенсации NSC. Однако в этой схеме компенсации существует конфликт между снижением NSC и снижением реактивной мощности, как отмечено в [41]. Если система потребляет реактивную мощность, SVC может не быть оптимальной схемой компенсации. Однако большинство современных поездов используют широтно-импульсную модуляцию (PWM) в своих приводах тяги, позволяющую регулировать коэффициент мощности примерно до 1. SVC известен как динамический компенсатор с низкой стоимостью, но его основным недостатком является его влияние на частоты резонанса в серии и параллельном соединении, как рассчитано в [41], что может накладывать ограничения на систему. В настоящее время схема SVC может быть использована в более гибких энергосистемах (например, рядом с крупными электростанциями), где она может быть экономически эффективной и технически достаточной.

В конце 90-х годов в Японии был разработан новый метод, называемый RPC (Rotating Phase Control), для улучшения качества электроснабжения систем. Эта схема включает использование двух однофазных преобразователей, соединенных друг с другом общей постоянной цепью. Каждый преобразователь специально разработан для компенсации конкретного участка на линии тяги и действует как однофазная нагрузка. Через эту конфигурацию активная и реактивная мощности передаются между двумя однофазными нагрузками. Схема RPC использует четыре ножи или перекрестные ветви, что составляет восемь силовых электронных ключей. Такая конфигурация позволяет одновременно компенсировать реактивную мощность, НКС (несинусоидальный ток) и гармоники [19]. С быстрым развитием электрификации железнодорожного транспорта промышленность железнодорожного транспорта столкнулась с новыми вызовами. RPC стало жизнеспособным решением проблемы растущего качества электропитания в электрических железных дорогах. Однако размер силовых электронных ключей в системе RPC разработан таким образом, чтобы составлять половину максимальной активной мощности каждого участка. В результате для этого требуется восемь крупных силовых электронных ключей, а также значительные системы охлаждения и вспомогательные установки, что

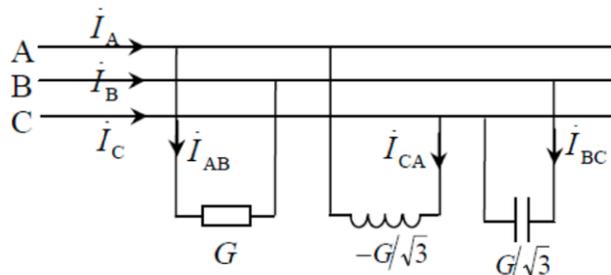


Рис. 7. Процесс компенсации статического компенсатора реактивной мощности (SVC) на основе закона Штейнметца [40]. Сначала измеряется сопротивление нагрузки, а затем компенсатор устанавливает индуктивность и емкость между двумя различными фазами в соответствии с принципами, изложенными в законе Штейнметца

Fig. 7. Compensation process of a static reactive power compensator (SVC) based on the Steinmetz law [40]. First, the load resistance is measured, and then the compensator sets the inductance and capacitance between two different phases in accordance with the principles set out in Steinmetz's law

приводит к более высоким затратам по сравнению с более старыми компенсаторами.

APQC (Асимметричный фазовый контроль) рассматривает всю систему как несбалансированную трехфазную нагрузку и состоит из трех ножек и шести силовых ключей (см. Рис. 6), но выполняет то же самое, что и RPC, при этом не увеличивается рейтинг силовых ключей. В [43] APQC подключается ко вторичной стороне ТСШ через Скоттовский трансформатор, который преобразует ортогональную двухфазную систему в симметричную трехфазную систему. Однако это решение не подходит, когда в ТСШ многих высокоскоростных тяговых линий используются V-v трансформаторы, поскольку напряжения на стороне двухфазной нагрузки не являются ортогональными (имеют разность фаз в 60 градусов из-за V-v трансформатора). В [44] APQC улучшается для работы с ТСШ типа V-v, которые широко применяются в тяговой промышленности.

В некоторых работах предлагаются эвристические схемы, называемые HPQC, которые сочетают вышеперечисленные методы с операционными улучшениями или подходами снижения рейтинга, или иногда обоими. Например, в [44] исследуется комбинация параллельного гибридного фильтра мощности и тиристорного регулируемого реактора.

#### Д. Классификация на основе теории

Различные стратегии компенсации используют разные теоретические методы для расчета и генерации компенсирующих токов [45]. На основе этих методов стратегии компенсации можно классифицировать следующим образом.

##### 1. Закон Штейнметца:

Однофазная активная нагрузка между фазами a и b, равная G, может быть симметризована индуктивной нагрузкой между фазами a и c, равной  $G/3$ , и емкостной нагрузкой между фазами b и c, равной  $G/3$ , как показано на Рис. 7. Этот закон является основой работы статического компенсатора реактивной мощности (SVC), в котором компенсирующие импедансы рассчитываются контрольным бло-

Таблица 1. Возможности различного оборудования  
Table 1. Capabilities of various equipment

Стратегии компенсации	Гармоническая компенсация	Компенсация несимметрии	Компенсация реактивной мощности	Общая стоимость	особые характеристики	
					Преимущества	Недостатки
Трёхфазные поезда	-	**	-	-	Исключение НСК без использования оборудования на стороне линии	Проблемы защиты, взаимодействие двух пантографов и т.д.
Фазовый сдвиг техника	-	*	-	-	Использование возможностей системы без дополнительных затрат	Единственным недостатком является сложность внедрения
Сбалансированные трансформаторы	-	*	-	*	Эффективное снижение трехфазного НСК (ненормального состояния симметрии)	Требуется дополнительные затраты, работает только при полной загрузке линии
SVC	-	**	**	**	Динамическое исключение НСК (ненормального состояния симметрии)	Проблема резонансной частоты
Пассивный фильтр	*	-	-	*	Низкая стоимость	Применяется только для определенных гармоник
RPC (реактивная мощность компенсатора)	**	**	**	****	Высокая производительность, общая компенсация	Высокая стоимость, использование 8 крупных силовых электронных ключей
APQC (активным силовым качеством)	**	**	**	***	Как (RPC) с двумя меньшими переключателями	Высокая стоимость, конденсатор на высоковольтной постоянной цепи
Софазность	***	***	***	****/** *	Как RPC, без наличия секционных разъединителей, применение с APQC	Высокая стоимость, сложная реализация TSS (типовой силовой субстанции)
HPQC	***	***	***	***	Более высокая производительность, низкая стоимость	Снижение надежности из-за увеличения числа используемых устройств

Больше звезд (\*) указывают на большую способность к улучшению/дополнительные затраты стратегии компенсации; тире (-) указывают на отсутствие способности/дополнительные затраты.

ком и применяются к системе через переменные конденсаторы и/или индукторы, управляемые тиристорами [40, 46, 47].

## 2. Мгновенная активная/неактивная мощность

Известно, что активная и реактивная мощности уникально зависят от активного и реактивного токов [43,48]. Поэтому в данном методе вычисляется фундаментальный ток ПСК для фундаментальной активной мощности, который вычитается из обще-

го тока для получения общего неактивного тока, называемого компенсационными токами. Эта теория является основой многих компенсационных структур, таких как RPC и APQC.

В работе [43] представлен метод генерации мгновенных активной и реактивной мощностей. В этом методе осуществляется преобразование напряжений и токов трехфазной системы, представленной в переменных  $abc$ , в ортогональную двухфазную систему, представленную в переменных  $\alpha\beta$ . После этого активная и реактивная составляющие мощности могут быть разделены. С помощью фильтра низких частот определяются постоянная и переменная составляющие активной и реактивной мощностей, после чего требуется только постоянная составляющая активной мощности, а все неактивные составляющие активной мощности, включая гармоническую мощность, компенсируются в рамках так называемой теории  $p-q$ .

Однако в этом методе невозможно учесть нулевую последовательность. В публикации [48] предлагается расширение этого метода на трехфазные четырехпроводные системы, и он получает название теории  $p-q-r$ . В электрических железнодорожных системах отсутствует нулевая последовательность, так как трансформаторы не имеют четвертого провода в системах переменного и постоянного тока. Поэтому для железнодорожных систем метод  $p-q-r$  не требуется. Несмотря на то, что в энергетических системах существует множество стратегий компенсации, в данной работе акцент делается на наиболее применимые стратегии в железнодорожной отрасли.

#### **V. Сравнение технических и экономических характеристик**

Назначение качества электроэнергии играет важную роль в правильном проектировании железнодорожной системы. Поэтому проектировщики должны изучить все возможные техники для обеспечения качества электроэнергии. Как и в любой инженерной задаче, здесь основной компромисс заключается между производительностью и стоимостью. Например, в случае низко нагруженной железнодорожной системы, расположенной рядом с крупной электростанцией, нет необходимости в использовании дорогостоящих методов компенсации, поскольку амплитуда отрицательной последовательности тока (NSC) или гармоник в железнодорожной системе может быть значительно ниже допустимых пределов NSC и гармоник электростанции (например, менее 1%). Характер системы определяет выбор конкретного метода/технологии. Однако принятие решения о подходящей схеме компенсации становится более критичным для высокомоментных железнодорожных систем, особенно для тех, что находятся далеко от надежной электростанции.

Таблица 1 сравнивает эти методы на основе улучшения качества электроэнергии и общей стоимости, указывая наиболее важные преимущества и недостатки каждого конкретного метода. При принятии решения необходимо изучить все эти техники/технологии.

#### **VI. Критерии выбора подходящей компенсации для конкретной железнодорожной линии**

Выбор подходящего метода компенсации для конкретной железнодорожной линии зависит от различных факторов и требований, специфичных для системы. Эти факторы играют важную роль в определении уровня требуемого качества электроэнергии. Некоторые из ключевых критериев, определяющих схему компенсации системы, перечислены ниже:

- Требуемый уровень качества электроэнергии с точки зрения точки общего подключения (PCC), включая разрешенные уровни отрицательного последовательного тока (NSC), гармоник и коэффициента мощности.
- Характеристики потока электроэнергии, такие как наличие возможности регенерации или ее отсутствие.
- Количество импульсов, особенно для постоянного тока (например, 6/12 импульсов).
- Стоимость, размеры, вес и эффективность системы компенсации.
- Электромагнитное влияние на системы связи и сигнализации.
- Факторы окружающей среды, включая окружающую температуру, высоту, уровень загрязнения, влажность, типы охлаждения и другие.
- Дополнительные факторы, определяющие стратегию компенсации, например емкость/уровень напряжения постоянного тока (для активных компенсаторов), понижающий трансформатор для уменьшения нагрузки на ключи, соответствие определенным стандартам и т. д.

Эти факторы вместе способствуют процессу принятия решения при выборе наиболее подходящей стратегии компенсации для конкретной железнодорожной линии.

#### **VII. Поздние тенденции и дальнейшее развитие схем компенсации в железнодорожном транспорте**

В разделе III обсуждаются основные методы обеспечения качества электроэнергии в железнодорожных системах. Однако по-прежнему продолжается разработка новых технологий для улучшения качества электроэнергии в железнодорожных системах. В концепции компенсаторов активной мощности для железнодорожных систем предложено улучшение APQC в [43], показанное на Рис. 8, в котором вместо трехфазного преобразователя в APQC или двух однофазных преобразователей в RPC используется полумостовой преобразователь. Предложенная схема имеет всего 4 ключа, но напряжение на ключах в два раза выше, чем на ключах в RPC/APQC. Кроме того, два конденсатора подключены последовательно на постоянном токе, создавая нейтральную точку как третью фазу.

Однако стоит отметить, что полумостовой преобразователь имеет две степени свободы, в то время как RPC и APQC имеют три степени свободы. Это приводит к более сложной системе управления и более низкой производительности, особенно в режиме регенерации. Несмотря на эти улучшения, требуется дальнейшее исследование и разработка

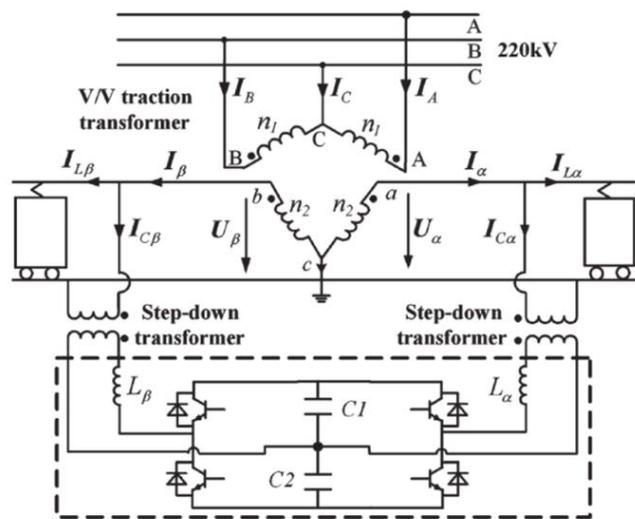


Рис. 8. Компенсатор качества электроэнергии железнодорожной системы на основе полумостового преобразователя [43]

Fig. 8. Power quality compensator for a railway system based on a half-bridge converter [43]

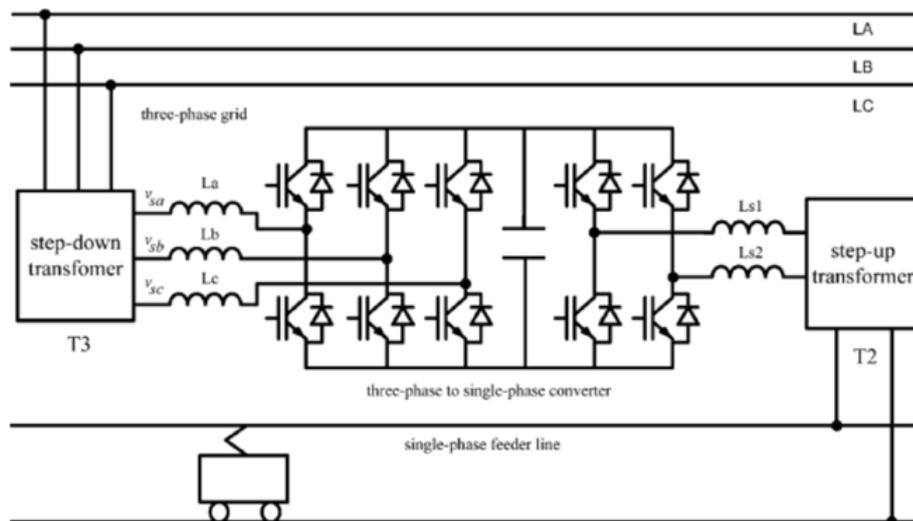


Рис. 9. Подробная конфигурация усовершенствованной кофазной системы электроснабжения [32]

Fig. 9. Detailed configuration of an advanced co-phase power supply system [32]

для оптимизации и улучшения методов компенсации качества электроэнергии в железнодорожных системах.

Большинство последних исследований направлены на разработку различных схем кофазной системы. Отрезки между двумя TSS в кофазной системе электроснабжения разделены секционными изоляторами, так как частота, амплитуда и фаза напряжения в каждом отрезке не могут быть синхронно управляемыми, как показано на Рис. 4(b). Разработана усовершенствованная кофазная система электроснабжения, как показано на Рис. 4(c), [32], в которой трехфазный преобразователь разделяет свой постоянный ток с однофазным преобразователем (см. Рис. 9). Частота, амплитуда и фаза напряжения в каждом отрезке устанавливаются равными смежным отрезкам, поэтому они могут быть подключены напрямую; следовательно, в этом методе не требуются секционные изоляторы, что

приводит к отсутствию ограничений на скоростной профиль, вызванный секционными изоляторами, и отсутствию дуговых разрядов при прохождении секций. Таким образом, это может быть лучшим выбором для будущих высокоскоростных поездов. Однако в этой схеме вся мощность поездов подается через полупроводниковые ключи силовой электроники. Эта схема подключения TSS, похоже, не является применимой из-за недостатков высокой стоимости и низкой надежности, по крайней мере, пока не будут разработаны соответствующие решения.

Другая схема кофазного электроснабжения разработана в [49,50], как показано на Рис. 10. В этой схеме используется комбинация Реактивного Компенсатора Мощности (RPC) и настроенного пассивного фильтра. Этот Гибридный Компенсатор Качества Электроэнергии (HPQC) направлен на минимизацию напряжения постоянного тока и гармонических токов на точке общего

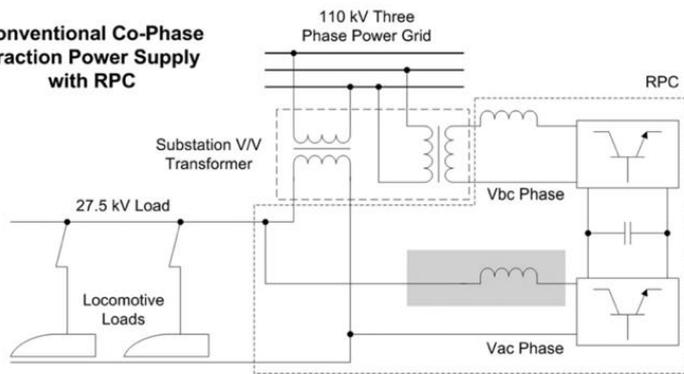
подключения (PCC). Показано, что такая комбинация приводит к снижению напряжения постоянного тока и уменьшению гармонических токов на PCC, что в результате позволяет уменьшить общий размер компенсатора.

Кроме того, в кофазных системах электроснабжения могут использоваться специально разработанные трансформаторы. Например, в [51] предлагается использовать трансформатор с импедансным соответствием, а в [17] используется трансформатор типа  $Y_n/v-d$  для улучшения защиты системы, особенно благодаря наличию нейтральной точки на первичной стороне.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены проблемы качества электроэнергии, связанные с тягой электрических железных дорог и их энергетическими сетями, а также возможные методы устранения проблем качества электроэнергии. Стратегии по улучшению качества

**Conventional Co-Phase  
Traction Power Supply  
with RPC**



*Рис. 10. Гибридный компенсатор качества электроэнергии с комбинацией пассивного фильтра и Реактивного Компенсатора Мощности (RPC) [50]*

*Fig. 10. Hybrid power quality compensator with combination of passive filter and Reactive Power Compensator (RPC) [50]*

электроэнергии были классифицированы на основе важных концепций, чтобы помочь исследователям понять основные идеи, связанные с качеством электроэнергии в системах электрифицированных железных дорог.

Для снижения/минимизации затрат на генерацию и передачу энергии логично использовать полную мощность линий передачи. Однако из-за проблем качества электроэнергии линии не могут быть полностью задействованы. Прогресс в области технологий силовой электроники и активных фильтров снизил затраты и позволил улучшить качество электроэнергии. Цель заключается в использовании активных компенсаторов для стандартных применений и использовании полной мощности дорогостоящего оборудования для передачи энергии.

При переходе от метода сдвига фаз к кофазной системе имеется компромисс между стоимостью и качеством. Статический компенсатор реактивной мощности (SVC) был первым активным методом компенсации отрицательной последовательности тока (NSC) и реактивной мощности, но он увеличивал количество и амплитуды гармоник в сети. Реактивный компенсатор мощности (RPC) широко используется в Восточной Азии, так как он одновременно снижает гармоники системы, реактивную мощность и NSC. В настоящее время с переходом на высокоскоростные железные дороги кофазная система представляется следующим комплексным поколением системы электроснабжения для электрифицированных железных дорог. В качестве альтернативы трехфазные выпрямители могут преобразовывать переменный ток в постоянный ток, а затем однофазные инверторы и трансформаторы обеспечивают однофазную энергию для контактной сети. Затем (см. Рис. 1) трансформатор локомотива регулирует напряжение и ток, подходящие для выпрямителя на стороне локомотива, создавая постоянное напряжение для трехфазного инвертора на стороне локомотива, который питает либо трехфазный индукционный двигатель, либо синхронный двигатель/генератор и может использоваться для регенерации во время торможения поезда.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абляимов О. С. Об энергетике электрических железных дорог // *Universum: Технические науки*. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10695>
2. Тороганов Э. В., Пышкин А. А. Электроснабжение железных дорог. [http://static.scbist.com/scb/uploaded/1\\_1400426538.pdf](http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1400426538.pdf)
3. Puse P., Bhasme Dr. N. A Review of Three Phase Inverters Used in Railway System // *International Journal of Electrical and Electronics Research*. 2019. Vol. 7, Issue 3. Pp 1-9. Available at: [www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com)
4. Li L., Wu M. A three-phase symmetric converter in AC electric railway systems for power quality and energy efficient improvement // *International transportation on electrical energy system*. 2021. Vol.31, Iss. 9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2050-7038.12598>
5. R. D. David while. Electrification traction and signalling compatibility. Conference: Railway Signalling and Control Systems, 2006. The 11th IET Professional Development Course on January 2006. [https://www.researchgate.net/publication/260725739\\_Electrification\\_traction\\_and\\_signalling\\_compatibility](https://www.researchgate.net/publication/260725739_Electrification_traction_and_signalling_compatibility)
6. Bajandooh A. A., Rawa M. J. Power Quality Disturbances of Electrified Railway // *International Journal of Engineering Research and Technology*. ISSN 0974-3154. 2020. Vol. 13, № 10 Pp. 3020–3028. <https://dx.doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.3020-3028>
7. Riego-Martinez J., Perez-Alonso M., Duque-Perez O. Influence of the rail electrification system topology on the energy consumption of train trajectories // *The international engineering and technology*. 2020. Vol. 14, Iss. 18. Pp. 3589–3598. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-rpg.2020.0119>
8. Alnuman H., Gladwin D., Foster M. Electrical Modelling of a DC Railway System with Multiple Trains // *Electrical Engineering*. <https://www.researchgate.net/publication/329091442>
9. Rozentale L., Mo B. G., Gravelsins A., Rochas C., Pubule J., Blumberga D. System Dynamics Modelling of Railway Electrification in Latvia // *Environmental and Climate Technologies*. 2020. Vol. 24. No. 2. Pp. 247–257. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0070> <https://content.sciendo.com>
10. Mariscotti A. Determination of the Electrical Parameters of Railway Traction Lines: Calculation, Measurement, and Reference Data // *IEEE transactions on power delivery*. 2004. vol. 19. no. 4. [https://www.researchgate.net/publication/3274902\\_Determination\\_of\\_the\\_Electrical\\_Parameters\\_of\\_Railway\\_Tracton\\_Lines\\_Calculation\\_Measurement\\_and\\_Reference\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/3274902_Determination_of_the_Electrical_Parameters_of_Railway_Tracton_Lines_Calculation_Measurement_and_Reference_Data)

11. Seferi Y. Analysis and Development of Power Quality Metrics for Railway Electric Networks // Dynamic Power Systems Laboratory Institute for Energy and Environment Electronic and Electrical Engineering Department University of Strathclyde. Glasgow August 17. 2022.
12. Chen K., Song Y., Lu X., Duan F. Sensitivity Analysis and Optimisation of Key Parameters for Railway Rigid Overhead System and Pantograph // Sustainability. 2023. 15. 6803. <https://doi.org/10.3390/su15086803>
13. Cho G.-J., Lee Ch., Kim J. Equivalent load estimation method for determining railway power requirements under extended feeding conditions using a simplex algorithm // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2022. 137. 107770. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521009923>
14. Panpean Ch., Areerak K., Santiprapan Ph., Areerak K., Shen Yeoh S. Harmonic Mitigation in Electric Railway Systems Using Improved Model Predictive Control // Energies 2021. 14. 2012. <https://doi.org/10.3390/en14072012>
15. Pinto J. G., Tanta M., Monteiro V., Barros L. A. M., Afonso J. L. Active Power Conditioner Based on a Voltage Source Converter for Harmonics and Negative Sequence Components Compensation in Electrified Railway Systems. TRA2018. Vienna. Austria. April 16-19. 2018.
16. Bueno J. M. Aller J. Restrepo T. Habetler. Harmonic and Balance Compensation using Instantaneous Active and Reactive Power Control on Electric Railway Systems // Conference Paper. 2010. <https://www.researchgate.net/publication/224125392>
17. Cui G., Luo L., Li Y., Liang Ch., Hu S., Xie B., Xu J., Zhang Zh., Liu Y., Wang T. YN/VD connected balance transformer-based hybrid power quality compensator for harmonic suppression and reactive power compensation of electrical railway power systems // Electrical Power and Energy Systems. 2019. 113. 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.067>
18. Maghsoud I., Ghassemi A., Farshad S., Saeed Fazel S. Current Balancing, Reactive Power and Harmonic Compensation Using a Traction Power Conditioner on Electrified Railway System // Conference: Electrical Engineering (ICEE), 21st Iranian Conference. 2013. [https://www.researchgate.net/publication/261317982\\_Current\\_balancing\\_reactive\\_power\\_and\\_harmonic\\_compensation\\_using\\_a\\_traction\\_power\\_conditioner\\_on\\_electrified\\_railway\\_system](https://www.researchgate.net/publication/261317982_Current_balancing_reactive_power_and_harmonic_compensation_using_a_traction_power_conditioner_on_electrified_railway_system)
19. Arabahmadi M., Banejad M., Dastfan A. Hybrid compensation method for traction power quality compensators in electrified railway power supply system // Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. 2021. Vol. 4. №2. 158–168. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511721000463>
20. Li Y., Hu J., Tang Zh., Xie Y., Zhou F. Feed-forward Compensation of Railway Static Power Conditioners in a V/V Traction Power Supply System / Electronics. 2021. 10. 656. <https://doi.org/10.3390/electronics10060656>
21. Zhao L., Liu Q. Hybrid Power Quality Compensation System for Electric Railway Supplied by the Hypotenuse of a Scott Transformer // IEEE Access. 2020. Vol. 8. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9296316>
22. He Zh., Zheng Zh., Hu H. Power quality in high-speed railway systems / International Journal of Rail Transportation. 2016. Vol. 4. № 2. Pp. 71–97. <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2016.1169228>
23. Kaleybar H. J., Brenna M., Foadelli F., Fazel S. S., Zaninelli D. Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification // Energies. 2020. 13. 6662. <http://www.mdpi.com/journal/energies>
24. Thorat R. S., Deshpande M. M. Power Quality Issues in Railway Electrification // International Journal of Computer Sciences and Engineering. 2016. Vol. 4. Iss. 1. [https://www.ijcseonline.org/pub\\_paper/6-IJCSE-01452.pdf](https://www.ijcseonline.org/pub_paper/6-IJCSE-01452.pdf)
25. Zhu Z., Wang Sh., Shao B., Yan L., Xu P., Ren Y. Advances in Dual-Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines and Control Techniques // Energies. 2021. 14. 7508. <https://doi.org/10.3390/en14227508>
26. Simiyu P., Davidson I. E. MVDC Railway Traction Power Systems; State-of-the Art, Opportunities, and Challenges // Energies. 2021. 14. 4156. <https://doi.org/10.3390/en14144156>
27. Zare M., Varjani A. Y., Dehghan S. M., Kavehei S. Power Quality Compensation and Power Flow Control in AC Railway Traction Power Systems // 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC) 12-14 February. Shiraz University, Iran. 2019.
28. Zhang R., Lin F., Yang Zh., Cao H., Liu Y. A Harmonic Resonance Suppression Strategy for a High-Speed Railway Traction Power Supply System with a SHE-PWM Four-Quadrant Converter Based on Active-Set Secondary Optimization // Energies. 2017. 10. 1567. <http://www.mdpi.com/journal/energies>
29. Lin B.-R. Integrated power quality compensator with three-level pwm AC/DC converter // Conference: Telecommunications Energy Conference, 2001. [https://www.researchgate.net/publication/3939411\\_Integrated\\_power\\_quality\\_compensator\\_with\\_three-level\\_pwm\\_ACDC\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/3939411_Integrated_power_quality_compensator_with_three-level_pwm_ACDC_converter)
30. Kebede A. B., Worku G. B. Power Electronics Converter Application in Traction Power Supply System // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2020. №9(4). Pp. 67–73. <http://www.sciencepublishinggroup.com/ajepes>
31. Bajpai Sh. Power Quality Improvement using AC To AC PWM converter for distribution line // International Journal of Engineering Inventions. 2013. Vol. 2. Iss. 11. Pp. 60–66. <http://www.ijejournal.com/papers/v2i11/K020116066.pdf>

32. Xiaoqiong H., Zeliang S., Xu P., Qi Z., Yingying Z., Qijun Z. et al. "Advanced Cophase Traction Power Supply System Based on Three-Phase to Single-Phase Converter," *IEEE Trans Power Electron.* 2014. Vol. 29. Pp. 5323-5333. <http://www.ieee.org/publications/standards/publications/rights/index.html> for more information.
33. Zhao Y., Li Q., Xia Y., Shu Z. Research on Co-phase Power Supply Test System. *Energy and Power Engineering.* 2013. 5. 522–526. doi:10.4236/epe.2013.54B100
34. Chena L., Chena M., Chen Yin., Chen Y., Cheng Y., Zhao N. Modelling and control of a novel AT-fed co-phase traction power supply system for electrified railway // *Electrical Power and Energy Systems.* 2021. Vol. 125. 106405. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061520308176>
35. Chen Ts.-H. Comparison of Scott and Leblanc transformers for supplying unbalanced electric railway demands // *Electric Power Systems Research.* 1994. 28. 235–240.
36. Cheng-Ping H., Chi-Jui W., Yung-Sung C., Shih-Kai P., Jung-Liang Y., Ming-Hong H. Loading characteristics analysis of specially connected transformers using various power factor definitions. *IEEE Trans Power Del.* 2006. Vol. 21. Pp. 1406–1413.
37. Gomes de Freitas L. C., Simoes M. G., Canesin C. A., de Freitas L. C. Performance Evaluation of a Novel Hybrid Multipulse Rectifier for Utility Interface of Power Electronic Converters. *IEEE Trans Ind. Electron.* 2007. Vol. 54. Pp. 3030–3041.
38. Tabakhpour Langerudy A., Mohammad Mousavi G. S. Hybrid railway power quality conditioner for high-capacity traction substation with auto-tuned DC-link controller // *IET Electrical Systems in Transportation.* 2016. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 207–214. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-est.2015.0045>
39. El-Sadek M. Static VAR compensation for phase balancing and power factor improvement of single phase train loads. *Elect. mach. power syst.* 1998. Vol. 26. Pp. 347–361.
40. Zhu G., Chen J., Liu X. Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC". // *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.* 2008. Pp. 1958–1963.
41. Guiping Zh., Jianye Ch., Xiaoyu L. Compensation for the Negative-sequence Currents of Electric Railway Based on SVC // *Conference: Industrial Electronics and Applications.* 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE. [https://www.researchgate.net/publication/224321973\\_Compensation\\_for\\_the\\_negative-sequence\\_currents\\_of\\_electric\\_railway\\_based\\_on\\_SVC](https://www.researchgate.net/publication/224321973_Compensation_for_the_negative-sequence_currents_of_electric_railway_based_on_SVC)
42. Luo A., Wu C., Shen J., Shuai Z., Ma F. "Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers" // *IEEE Trans. Power Electron.* 2011. Vol. 26. Pp. 2844–2856.
43. Zhuo S., Xinjian J., Dongqi Z., Guixin. Z. "A novel active power quality compensator topology for electrified railway" // *IEEE Trans. Power Electron.* 2004. Vol. 19. Pp. 1036–1042.
44. Neelima V., Kumudwathi M., Tech M. Power Quality Improvement using a Combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor-Controlled Reactor // *International Journal of Computational Science, Mathematics and Engineering.* 2015. Vol. 2. Iss. 4. ISSN(online): 2349-8439. <http://nebula.wsimg.com/b48d3d95a0c03627684642173c701b9e?AccessKeyId=B2B591DC2411A835F970&alloworigin=1&disposition=0>.
45. Morais V. A., Afonso J. L., Carvalho A. S., Martins A. P. New Reactive Power Compensation Strategies for Railway Infrastructure Capacity Increasing // *Energies.* 2020. 13. 4379. doi:10.3390/en13174379.
46. H. Wang, Y. Liu, K. Yan, Y. Fu, Ch. Zhang. Analysis of static Var compensators installed in different positions in electric railways // *IET Electrical Systems in Transportation, Transp.* 2015. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 129–134. [https://shop.tarjomeplus.com/UploadFileEn/TPLUS\\_EN\\_2923.pdf](https://shop.tarjomeplus.com/UploadFileEn/TPLUS_EN_2923.pdf)
47. Murad M. A. A., Liu M. Frequency Control Through Voltage Regulation of Power System Using SVC Devices. <https://n.ethz.ch/~gtzounas/pap/freqsvc.pdf>
48. Luo A., Shuai Zh., Zhu W., Shen Z. J. Combined System for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation // *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. VOL. 56. NO. 2.
49. Lao K.-W., Wong M.-Ch. Hybrid Power Quality Compensator With Minimum DC Operation Voltage Design for High-Speed Traction Power Systems // *IEEE Trans. Power Electron.* 2013. VOL. 28. NO. 4. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6203598>
50. Lao K. W., Wong M. C., Dai N., Wong C. K., Lam C. S. "A Systematic Approach to Hybrid Railway Power Conditioner Design with Harmonic Compensation for High-Speed Railway" // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2341577>
51. Zeliang S., Shaofeng X., Ke L., Yuanzhe Z., Xiaoqiang N., Daqiang Q. et al. "Digital Detection, Control, and Distribution System for Co-Phase Traction Power Supply Application" // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013. Vol. 60. Pp. 1831–1839.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
Об авторах:

**Алсултан Мохаммед Джафар Джасим**, аспирант, Российский Университет Транспорта (МИИТ), (127055, Россия, г. Москва, ул. Образцова, 9), e-mail: 1144648@edu.rut-miit.ru

Заявленный вклад авторов:

**Алсултан Мохаммед Джафар Джасим** – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-3-19

**Alsultan Mohammed Jaafar Jasim**

Russian University of Transport

\*E-mail: 1144648@edu.rut-miit.ru

## STUDY ON POWER QUALITY ISSUES IN RAILWAY ELECTRIFICATION: IN-DEPTH ANALYSIS



### Article info

Received:

14 July 2023

Accepted for publication:

15 August 2023

Accepted:

01 September 2023

Published:

12 September 2023

**Keywords:** tunneling machine, asynchronous electric motor, electric drive, hidden oscillations, Sommerfeld effect.

### Abstract.

Since the beginning of railway electrification, power quality issues have been a major concern in railway networks due to their unique characteristics. Throughout the history of railway electrification, numerous methods have been studied and implemented to improve the power quality in both AC and DC traction power supply systems. This article provides an overview of power quality issues in the development of railway electrification and explores the importance of power quality and the requirements for systems to ensure appropriate power quality. Compensation strategies are discussed and compared. The goal is to provide a comprehensive overview of the power quality issue in railway power supply/distribution networks for researchers and engineers working in the field of railway electrification

**For citation:** Alsultan Mohammed Jaafar Jasim Study on Power Quality Issues in Railway Electrification: Indepth Analysis. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 3(168):3-19 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-4-3-19, EDN: KHHKCY

### REFERENCES

1. Abylaimov O.S. On The Energy Of Electric Railways. *Universum: Technical Sciences*. <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10695>

2. Teroganov E.V., Pyshkin A.A. Electric Power Supply of Railways. [http://static.scbist.com/scb/uploaded/1\\_1400426538.pdf](http://static.scbist.com/scb/uploaded/1_1400426538.pdf)

3. Puse P., Bhasme Dr. N. A Review of Three Phase Inverters Used in Railway System // International Journal of Electrical and Electronics Research. 2019. Vol. 7, Issue 3. Pp 1-9. Available at: [www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com)

4. Li L., Wu M. A three-phase symmetric converter in AC electric railway systems for power quality and energy efficient improvement // International transportation on electrical energy system. 2021. Vol.31, Iss. 9. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2050-7038.12598>

5. R. D. David while. Electrification traction and signalling compatibility. Conference: Railway Signalling and Control Systems, 2006. The 11th IET Professional Development Course on January 2006. [https://www.researchgate.net/publication/260725739\\_Electrification\\_traction\\_and\\_signalling\\_compatibility](https://www.researchgate.net/publication/260725739_Electrification_traction_and_signalling_compatibility)

6. Bajandooh A. A., Rawa M. J. Power Quality Disturbances of Electrified Railway // *International Journal of Engineering Research and Technology*. ISSN 0974-3154. 2020. Vol. 13, № 10 Pp. 3020–3028. <https://dx.doi.org/10.37624/IJERT/13.10.2020.3020-3028>
7. Riego-Martinez J., Perez-Alonso M., Duque-Perez O. Influence of the rail electrification system topology on the energy consumption of train trajectories // *The international engineering and technology*. 2020. Vol. 14, Iss. 18. Pp. 3589–3598. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-rpg.2020.0119>
8. Alnuman H., Gladwin D., Foster M. Electrical Modelling of a DC Railway System with Multiple Trains // *Energies*. <https://www.researchgate.net/publication/329091442>
9. Rozentale L., Mo B. G., Gravelsins A., Rochas C., Pubule J., Blumberga D. System Dynamics Modelling of Railway Electrification in Latvia // *Environmental and Climate Technologies*. 2020. Vol. 24, No. 2. Pp. 247–257. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0070> <https://content.sciendo.com>
10. Mariscotti A. Determination of the Electrical Parameters of Railway Traction Lines: Calculation, Measurement, and Reference Data // *IEEE transactions on power delivery*. 2004. vol. 19. no. 4. [https://www.researchgate.net/publication/3274902\\_Determination\\_of\\_the\\_Electrical\\_Parameters\\_of\\_Railway\\_Traction\\_Lines\\_Calculation\\_Measurement\\_and\\_Reference\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/3274902_Determination_of_the_Electrical_Parameters_of_Railway_Traction_Lines_Calculation_Measurement_and_Reference_Data)
11. Seferi Y. Analysis and Development of Power Quality Metrics for Railway Electric Networks // *Dynamic Power Systems Laboratory Institute for Energy and Environment Electronic and Electrical Engineering Department University of Strathclyde*. Glasgow August 17. 2022.
12. Chen K., Song Y., Lu X., Duan F. Sensitivity Analysis and Optimisation of Key Parameters for Railway Rigid Overhead System and Pantograph // *Sustainability*. 2023. 15. 6803. <https://doi.org/10.3390/su15086803>
13. Cho G.-J., Lee Ch., Kim J. Equivalent load estimation method for determining railway power requirements under extended feeding conditions using a simplex algorithm // *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. 137. 107770. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521009923>
14. Panpean Ch., Areerak K., Santiprapan Ph., Areerak K., Shen Yeoh S. Harmonic Mitigation in Electric Railway Systems Using Improved Model Predictive Control // *Energies* 2021. 14. 2012. <https://doi.org/10.3390/en14072012>
15. Pinto J. G., Tanta M., Monteiro V., Barros L. A. M., Afonso J. L. Active Power Conditioner Based on a Voltage Source Converter for Harmonics and Negative Sequence Components Compensation in Electrified Railway Systems. TRA2018. Vienna. Austria. April 16-19. 2018.
16. Bueno J. M. Aller J. Restrepo T. Habetler. Harmonic and Balance Compensation using Instantaneous Active and Reactive Power Control on Electric Railway Systems // *Conference Paper*. 2010. <https://www.researchgate.net/publication/224125392>
17. Cui G., Luo L., Li Y., Liang Ch., Hu S., Xie B., Xu J., Zhang Zh., Liu Y., Wang T. YN/VD connected balance transformer-based hybrid power quality compensator for harmonic suppression and reactive power compensation of electrical railway power systems // *Electrical Power and Energy Systems*. 2019. 113. 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.067>
18. Maghsoud I., Ghassemi A., Farshad S., Saeed Fazel S. Current Balancing, Reactive Power and Harmonic Compensation Using a Traction Power Conditioner on Electrified Railway System // *Conference: Electrical Engineering (ICEE), 21st Iranian Conference*. 2013. [https://www.researchgate.net/publication/261317982\\_Current\\_balancing\\_reactive\\_power\\_and\\_harmonic\\_compensation\\_using\\_a\\_traction\\_power\\_conditioner\\_on\\_electrified\\_railway\\_system](https://www.researchgate.net/publication/261317982_Current_balancing_reactive_power_and_harmonic_compensation_using_a_traction_power_conditioner_on_electrified_railway_system)
19. Arabahmadi M., Banejad M., Dastfan A. Hybrid compensation method for traction power quality compensators in electrified railway power supply system // *Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization*. 2021. Vol. 4. №2. 158–168. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511721000463>
20. Li Y., Hu J., Tang Zh., Xie Y., Zhou F. Feed-forward Compensation of Railway Static Power Conditioners in a V/V Traction Power Supply System / *Electronics*. 2021. 10. 656. <https://doi.org/10.3390/electronics10060656>
21. Zhao L., Liu Q. Hybrid Power Quality Compensation System for Electric Railway Supplied by the Hypotenuse of a Scott Transformer // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9296316>
22. He Zh., Zheng Zh., Hu H. Power quality in high-speed railway systems / *International Journal of Rail Transportation*. 2016. Vol. 4. № 2. Pp. 71–97. <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2016.1169228>
23. Kaleybar H. J., Brenna M., Foadelli F., Fazel S. S., Zaninelli D. Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification // *Energies*. 2020. 13. 6662. <http://www.mdpi.com/journal/energies>
24. Thorat R. S., Deshpande M. M. Power Quality Issues in Railway Electrification // *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 2016. Vol. 4. Iss. 1. [https://www.ijcsonline.org/pub\\_paper/6-IJCSE-01452.pdf](https://www.ijcsonline.org/pub_paper/6-IJCSE-01452.pdf)
25. Zhu Z., Wang Sh., Shao B., Yan L., Xu P., Ren Y. Advances in Dual-Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines and Control Techniques // *Energies*. 2021. 14. 7508. <https://doi.org/10.3390/en14227508>
26. Simiyu P., Davidson I. E. MVDC Railway Traction Power Systems; State-of-the Art, Opportunities, and Challenges // *Energies*. 2021. 14. 4156. <https://doi.org/10.3390/en14144156>

27. Zare M., Varjani A. Y., Dehghan S. M., Kavehei S. Power Quality Compensation and Power Flow Control in AC Railway Traction Power Systems // 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC) 12-14 February. Shiraz University, Iran. 2019.
28. Zhang R., Lin F., Yang Zh., Cao H., Liu Y. A Harmonic Resonance Suppression Strategy for a High-Speed Railway Traction Power Supply System with a SHE-PWM Four-Quadrant Converter Based on Active-Set Secondary Optimization // *Energies*. 2017. 10. 1567. <http://www.mdpi.com/journal/energies>
29. Lin B.-R. Integrated power quality compensator with three-level pwm AC/DC converter // Conference: Telecommunications Energy Conference, 2001. [https://www.researchgate.net/publication/3939411\\_Integrated\\_power\\_quality\\_compensator\\_with\\_three-level\\_pwm\\_ACDC\\_converter](https://www.researchgate.net/publication/3939411_Integrated_power_quality_compensator_with_three-level_pwm_ACDC_converter)
30. Kebede A. B., Worku G. B. Power Electronics Converter Application in Traction Power Supply System // *American Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020. №9(4). Pp. 67–73. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/epes>
31. Bajpai Sh. Power Quality Improvement using AC To AC PWM converter for distribution line // *International Journal of Engineering Inventions*. 2013. Vol. 2. Iss. 11. Pp. 60–66. <http://www.ijejournal.com/papers/v2i11/K020116066.pdf>
32. Xiaoqiong H., Zeliang S., Xu P., Qi Z., Yingying Z., Qijun Z. et al. "Advanced Cophase Traction Power Supply System Based on Three-Phase to Single-Phase Converter," *IEEE Trans Power Electron*. 2014. Vol. 29. Pp. 5323-5333. [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html) for more information.
33. Zhao Y., Li Q., Xia Y., Shu Z. Research on Co-phase Power Supply Test System. *Energy and Power Engineering*. 2013. 5. 522–526. doi:10.4236/epe.2013.54B100
34. Chena L., Chena M., Chen Yin., Chen Y., Cheng Y., Zhao N. Modelling and control of a novel AT-fed co-phase traction power supply system for electrified railway // *Electrical Power and Energy Systems*. 2021. Vol. 125. 106405. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061520308176>
35. Chen Ts.-H. Comparison of Scott and Leblanc transformers for supplying unbalanced electric railway demands // *Electric Power Systems Research*. 1994. 28. 235–240.
36. Cheng-Ping H., Chi-Jui W., Yung-Sung C., Shih-Kai P., Jung-Liang Y., Ming-Hong H. Loading characteristics analysis of specially connected transformers using various power factor definitions. *IEEE Trans Power Del*. 2006. Vol. 21. Pp. 1406–1413.
37. Gomes de Freitas L. C., Simoes M. G., Canesin C. A., de Freitas L. C. Performance Evaluation of a Novel Hybrid Multipulse Rectifier for Utility Interface of Power Electronic Converters. *IEEE Trans Ind. Electron*. 2007. Vol. 54. Pp. 3030–3041.
38. Tabakhpour Langerudy A., Mohammad Mousavi G. S. Hybrid railway power quality conditioner for high-capacity traction substation with auto-tuned DC-link controller // *IET Electrical Systems in Transportation*. 2016. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 207–214. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1049/iet-est.2015.0045>
39. El-Sadek M. Static VAR compensation for phase balancing and power factor improvement of single phase train loads. *Elect. mach. power syst*. 1998. Vol. 26. Pp. 347–361.
40. Zhu G., Chen J., Liu X. Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC". // *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl*. 2008. Pp. 1958–1963.
41. Guiping Zh., Jianye Ch., Xiaoyu L. Compensation for the Negative-sequence Currents of Electric Railway Based on SVC // Conference: Industrial Electronics and Applications. 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE. [https://www.researchgate.net/publication/224321973\\_Compensation\\_for\\_the\\_negative-sequence\\_currents\\_of\\_electric\\_railway\\_based\\_on\\_SVC](https://www.researchgate.net/publication/224321973_Compensation_for_the_negative-sequence_currents_of_electric_railway_based_on_SVC)
42. Luo A., Wu C., Shen J., Shuai Z., Ma F. "Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers" // *IEEE Trans. Power Electron*. 2011. Vol. 26. Pp. 2844–2856.
43. Zhuo S., Xinjian J., Dongqi Z., Guixin. Z. "A novel active power quality compensator topology for electrified railway" // *IEEE Trans. Power Electron*. 2004. Vol. 19. Pp. 1036–1042.
44. Neelima V., Kumudwathi M., Tech M. Power Quality Improvement using a Combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor-Controlled Reactor // *International Journal of Computational Science, Mathematics and Engineering*. 2015. Vol. 2. Iss. 4. ISSN(online): 2349-8439. <http://nebula.wsimg.com/b48d3d95a0c03627684642173c701b9e?AccessKeyId=B2B591DC2411A835F970&alloworigin=1&disposition=0>.
45. Morais V. A., Afonso J. L., Carvalho A. S., Martins A. P. New Reactive Power Compensation Strategies for Railway Infrastructure Capacity Increasing // *Energies*. 2020. 13. 4379. doi:10.3390/en13174379.
46. H. Wang, Y. Liu, K. Yan, Y. Fu, Ch. Zhang. Analysis of static Var compensators installed in different positions in electric railways // *IET Electrical Systems in Transportation, Transp*. 2015. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 129–134. [https://shop.tarjomeplus.com/UploadFileEn/TPLUS\\_EN\\_2923.pdf](https://shop.tarjomeplus.com/UploadFileEn/TPLUS_EN_2923.pdf)
47. Murad M. A. A., Liu M. Frequency Control Through Voltage Regulation of Power System Using SVC Devices. <https://n.ethz.ch/~gtzounas/pap/freqsvc.pdf>
48. Luo A., Shuai Zh., Zhu W., Shen Z. J. Combined System for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation // *IEEE Trans. Power Electron*. 2009. VOL. 56. NO. 2.
49. Lao K.-W., Wong M.-Ch. Hybrid Power Quality Compensator With Minimum DC Operation Voltage Design for High-Speed Traction Power Systems // *IEEE Trans. Power Electron*. 2013. VOL. 28. NO. 4. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6203598>

50. Lao K. W., Wong M. C., Dai N., Wong C. K., Lam C. S. "A Systematic Approach to Hybrid Railway Power Conditioner Design with Harmonic Compensation for High-Speed Railway" // IEEE Trans. Ind. Electron. 2014. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2341577>

51. Zeliang S., Shaofeng X., Ke L., Yuanzhe Z., Xiaoqiang N., Daqiang Q. et al. "Digital Detection, Control, and Distribution System for Co-Phase Traction Power Supply Application" // IEEE Trans. Ind. Electron. 2013. Vol. 60. Pp. 1831–1839.

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The author declares no conflict of interest.*

*About the author:*

**Alsultan Mohammed Jaafar Jasim**, postgraduate, Russian University of Transport (MIIT), (9 Obratsova str., Moscow, 127055), e-mail: [1144648@edu.rut-miit.ru](mailto:1144648@edu.rut-miit.ru)

*Contribution of the authors:*

Alsultan Mohammed Jaafar Jasim – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; drawing the conclusions; writing the text.

*Author have read and approved the final manuscript.*

