

УДК 621.33

А.Д. Зарубин, Л.А. Астраханцев, В.А. Тихомиров

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Аннотация. Рассмотрены основные системы тягового электроснабжения, применяемые на железных дорогах России, а также технические решения по усилению этих систем, что разрабатываются как в России, так и за рубежом. Выделены их основные преимущества и недостатки, а также факторы, ограничивающие возможность их использования для дальнейшего развития систем тяги. Рассмотрены системы тягового электроснабжения на постоянном токе 3 кВ, на переменном токе промышленной частоты 50 Гц 25 кВ и 2х25 кВ, и их возможности усиления. Разобраны технические решения, предлагающие возможность повышения эффективности работы систем тяги.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, усиление систем тяги, инфраструктура железных дорог, энергетическая эффективность

A.D. Zarubin, L.A. Astrakhantsev, V.A. Tikhomirov

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

PROMISING DIRECTION OF TECHNICAL MODERNIZATION OF TRACTION POWER SUPPLY OF RAILWAYS

Annotation. The main traction power supply systems used on the railways of Russia are considered, as well as technical solutions to strengthen these systems that are being developed both in Russia and abroad. Their main advantages and disadvantages are highlighted, as well as factors limiting the possibility of their use for further development of traction systems. Traction power supply systems with direct current of 3 kV, alternating current of industrial frequency of 50 Hz of 25 kV and 2x25 kV, and their amplification capabilities are considered. Technical solutions offering the possibility of improving the efficiency of traction systems are analyzed.

Keywords: traction power supply system, reinforcement of traction systems, railway infrastructure, energy efficiency

Введение

Транспортная инфраструктура железных дорог России имеет сбалансированную техническую базу и соответствующие ресурсы для обеспечения заданного уровня перевозочного процесса. Применяемые на железных дорогах системы тягового электроснабжения позволяют пропускать грузовые поезда со средней скоростью в 120 км/ч, к тому же, реализовано высокоскоростное пассажирское движение. Инфраструктура железных дорог рассчитана на среднюю скорость движения грузовых поездов примерно в 100 км/ч, однако средняя техническая скорость движения составляет около 60 км/ч. Это обуславливается сложностью рельефа, из-за которого системы тяги не способны поддерживать заданную скорость тяжеловесных грузовых поездов на необходимом уровне. Недостаточная эффективность работы применяемых систем тягового электроснабжения является фактором, ограничивающим рост скорости движения и массы поездов. Для дальнейшего увеличения объемов перевозочного процесса необходима модернизация тягового электроснабжения, а для этого, нужно выделить все преимущества существующих технических решений различных систем и факторы, ограничивающие их использование

Системы тягового электроснабжения на переменном токе

Существующая однофазная система электрической тяги железных дорог переменного тока содержит электротяговую сеть с контактным проводом, тяговые подстанции с трехфазными трансформаторами, тяговый рельс, соединенный с одной из фаз трехфазного трансформатора, электроподвижной состав с тяговыми электродвигателями, устройство токосъема. Повышение провозной способности достигается применением коаксиальных кабелей (Рисунок 1), усиливающих и экранирующих проводов. По сравнению с системой 25 кВ подсистема 25

кВ с коаксиальным кабелем или УЭП позволяет повысить провозную способность участка в 1,4 раза [1].

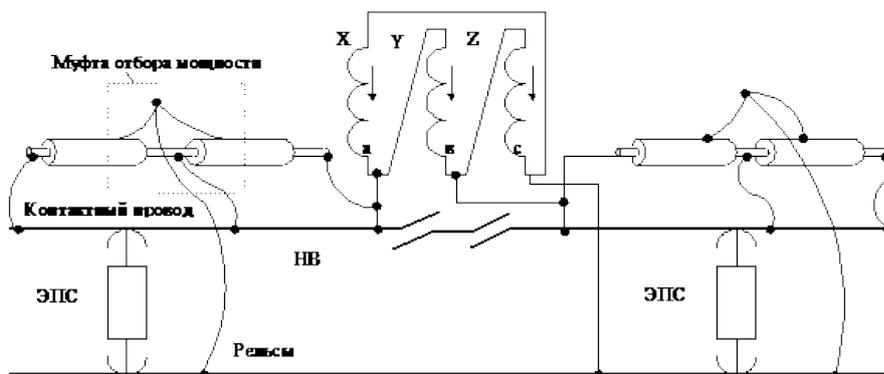


Рис. 1 – Система тяги переменного тока 25 кВ с коаксиальным кабелем

Значительное усиление провозной способности по сравнению с системой 25 кВ наблюдается при использовании системы 2х25 кВ – почти в 2 раза. Реализация системы достигается за счет применения дополнительной питающей линии, которая через автотрансформаторы подключается к контактному проводу, а также с использованием однофазных трансформаторов на тяговых подстанциях. Дальнейшее повышение провозной способности может быть достигнуто при повышении в питающем проводе напряжения вместо 25 кВ до 35 - 110 кВ [2].

Доктором технических наук Р.Р. Мамошиным, МИИТ, предложена разработка по повышению провозной способности системы на переменном токе – Система с головными тяговыми подстанциями с симметрирующими трансформаторами, двухпроводными продольными линиями ДПЛ - 94 кВ и промежуточными ТП с однофазными трансформаторами, с выходом головных тяговых подстанций на электрические сети общего назначения каждые 200-300 км (Рисунок 2). Эта система направлена не только на повышение напряжения в контактной сети, но и на симметрирование нагрузки в сетях общего назначения [3].

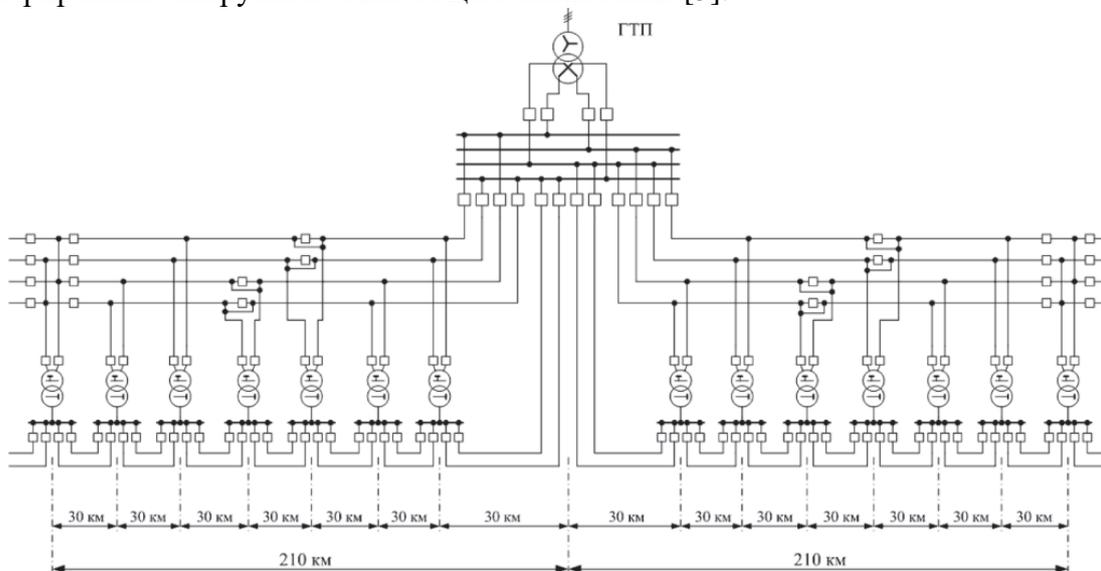


Рис. 2 - Система с головными тяговыми подстанциями с симметрирующими трансформаторами, двухпроводными продольными линиями ДПЛ - 94 кВ и промежуточными ТП с однофазными трансформаторами

Доктором технических наук Б.А. Аржанниковым, УрГУПС, предложена разработка – Вольтодобавочное устройство с однофазным вольтодобавочным трансформатором (Рисунок 3), первичная обмотка которого подключена к загруженной на 33% мощности тяговой обмотке силового трансформатора, а каждая из однофазных вторичных обмоток включается в расщепки выводов силового трансформатора к шинам 27,5 кВ тяговой подстанции и имеет устройство регулирования напряжения, обеспечивающее равенство напряжения соответствующих фаз

шин 27,5 кВ соседних тяговых подстанций, что ведет дополнительно к снижению уравнивающих токов в системе тяговой и питающей сети [4].

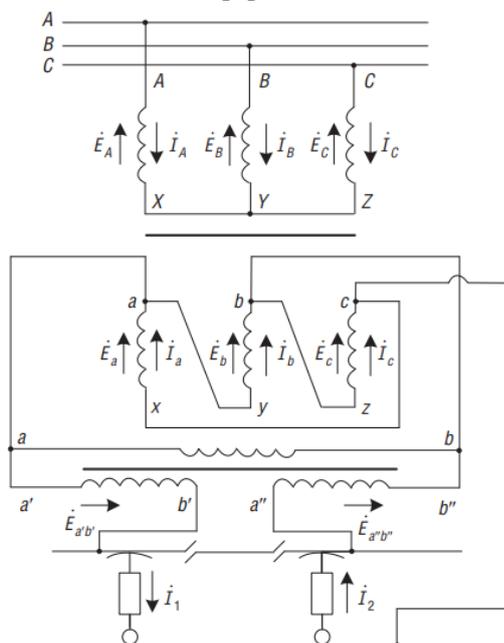


Рис. 3 - Вольтодобавочное устройство с однофазным вольтодобавочным трансформатором

Компанией Siemens AG в XX веке была испытана трехфазная система электрической тяги (Рисунок 4). Она состоит из дополнительного контактного провода, при этом провода двух фаз А и В трехфазного силового трансформатора тяговой подстанции подключаются соответственно к основному и дополнительному контактным проводам. Третья фаза С подключена к тяговому рельсу. Также имеется дополнительное устройство токосяема, идентичное основному. Полз токоприемников располагался горизонтально под контактными проводами. Данной система позволяет симметризовать нагрузку питающей сети, использовать полную мощность трансформатора, и стабилизировать уровень напряжения в контактной сети [5].

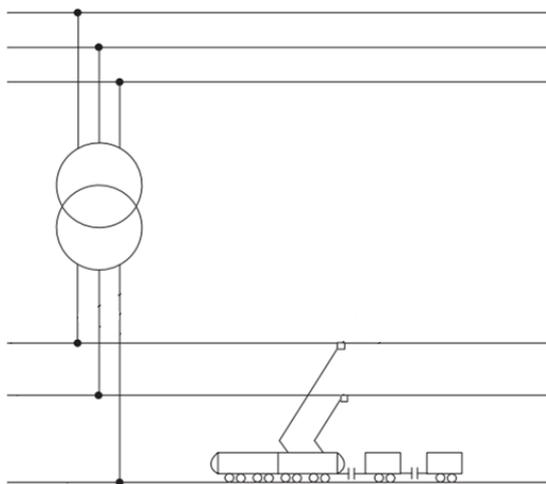


Рис. 4 - Трехфазная система электрической тяги

Все перечисленные технические решения по усилению системы тягового электроснабжения на переменном токе позволяют решать лишь некоторые проблемы, связанные с использованием переменного тока. Однако, остаются проблемы, связанные с использованием систем на переменном токе [6]:

1 Наличие реактивной мощности. Реактивная мощность является одним из главных источников потерь в тяговой сети, уменьшая тем самым общее КПД системы. Также, тяговый электродвигатель электроподвижного состава, являясь реактивным элементом, при высокой нагрузке вызывает увеличение реактивной составляющей системы, что ведет к росту потерь мощности и появляется необходимость ее компенсации.

2 Наличие электромагнитного поля, что приводит к неустойчивой работе систем связи, нарушению работы других электротехнических устройств и создает опасность для работающего персонала.

Приведённые факторы, ограничивающие возможность роста скорости движения и массы поездов, могут быть частично компенсированы с помощью современных технических решений, предложенных для системы тяги переменного тока, однако комплексного решения проблемы нет, что приводит к усложнению системы и отсутствию её дальнейшего развития.

Система тягового электроснабжения на постоянном токе

Существующая система тягового электроснабжения на постоянном токе содержит электротяговую сеть с контактным проводом КС, тяговые подстанции с преобразовательным агрегатом, который состоит из трехфазного трансформатора, к выводам которого подключается выпрямительно-инверторный преобразователь, тяговый рельс, соединенный с шиной «минус» тяговой подстанции, электроподвижной состав с тяговыми электродвигателями, устройство токосъема, сообщаемое с контактным проводом [7].

Доктором технических наук Б.А. Аржанниковым предложено введение на тяговых подстанциях устройств бесконтактного автоматического регулирования напряжения – БАРН (Рисунок 5), что обеспечило бы повышение напряжения в контактной сети, со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровнях 3500-3700 В, а также повышение КПД системы тягового электроснабжения [8].

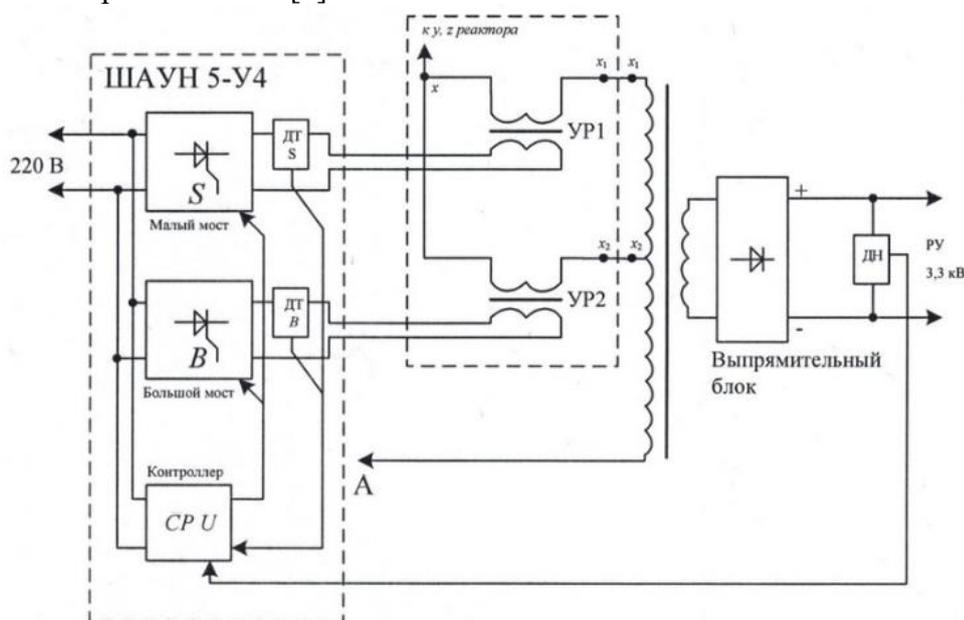


Рис. 5 – Устройство бесконтактного автоматического регулирования напряжения

Повышение напряжения и КПД системы тягового электроснабжения способствует также применение на тяговых подстанциях 12-типульсовых преобразовательных агрегатов с возможностью применения 24 или 48 пульсовых преобразователей, упрощающих (исключающих) фильтрующие устройства на тяговых подстанциях и снижающих электромагнитное влияние на систему железнодорожной связи и автоматики [9].

Также, Доктором технических наук Б.А. Аржанниковым предложено применение пунктов повышенного напряжения – ППН (Рисунок 6), состоящих из инверторного и выпрямительного блока. Выпрямительный блок подключен к контактной сети и к тяговому рельсу. На тяговой подстанции от отдельного преобразовательного агрегата повышенного напряжения 6,6 кВ или от двух последовательно включенных преобразовательных агрегатов питание подается в дополнительный провод повышенного напряжения. На ППН инвертор преобразует высокое напряжение постоянного тока в высокое напряжение переменного тока, понижается трансформатором и через выпрямительный блок напряжение 3,3 кВ постоянного тока подается в контактную сеть. Такая схема позволяет снизить нагрузку на тяговые подстанции и фидеры контактной сети, а также улучшить защиту тяговой сети от токов короткого замыкания [10].

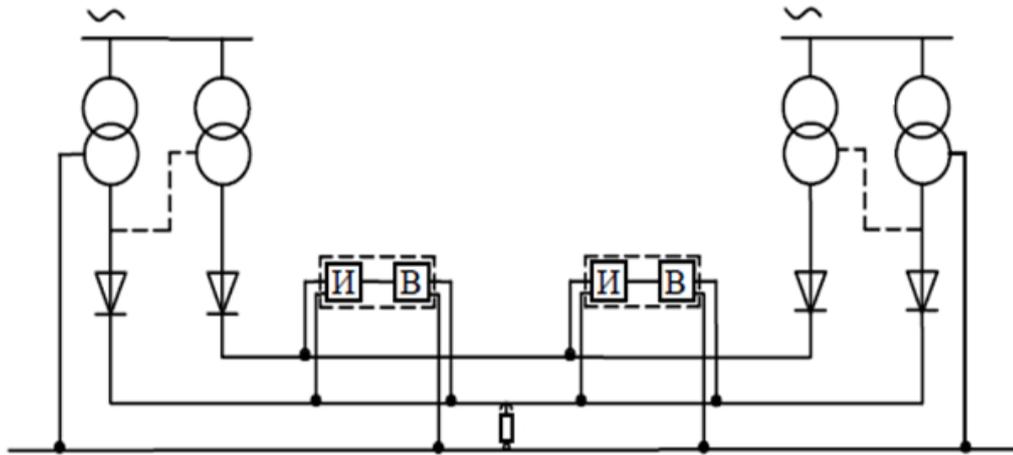


Рис. 6 – Система тяги постоянного тока с применением пунктов повышенного напряжения

Система тяги на постоянном токе ограничена по пропускной способности, имеет повышенные расходы на медь и электроэнергию, а также малые расстояния между подстанциями. Развитие системы упирается в создание высоковольтного преобразовательного агрегата, с помощью которого будет возможность получать повышенное напряжение постоянного тока, для использования его при передаче электроэнергии к токоприемнику электроподвижного состава и устройство для преобразования полученного напряжения и тока в питающее напряжение и ток электродвигателей подвижного состава [11].

В России и Италии предлагались способы, направленные на повышение напряжения передачи энергии к поездам до 6, 12, 24 кВ.

Под руководством Доктора технических наук В.Е. Розенфельда, Московский энергетический институт, была создана система электрической тяги 6 кВ. На электровозе преобразователь постоянно-постоянного тока 6/3 кВ был выполнен из несовершенных выпрямительных приборов, что привело к неуспешным испытаниям. Напряжение 6кВ в контактную сеть подавалось от каждого выключения существующих выпрямителей подстанции [12].

В 1970 годы была организована от тяговой подстанции передача электрической энергии напряжением 6 кВ постоянного тока по отдельному фидеру на перегон к преобразователю 6/3 кВ и далее в контактную сеть, так называемая схема Третьяка (Рисунок 7). Система из-за сложности схемы и в дальнейшем из-за несовершенства преобразователя 6/3 кВ не нашла применения [13].

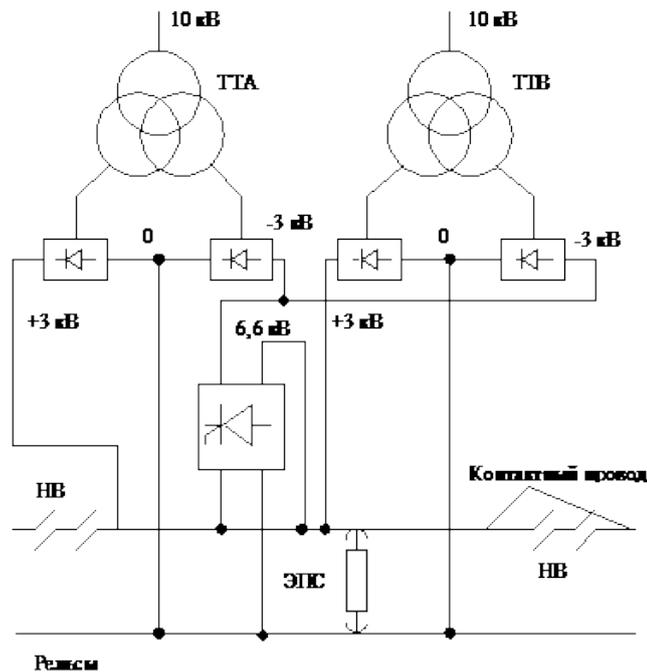


Рис. 7 – Схема Третьяка

По заданию Главного управления электрификации и энергетического хозяйства – ЦЭ МПС, под руководством Доктора технических наук А.Т. Бурковым Министерством путей сообщения под Санкт-Петербургом был оборудован опытный участок с напряжением 12 кВ (Рисунок 8). В 1995г испытания из-за отсутствия финансирования были остановлены [14].

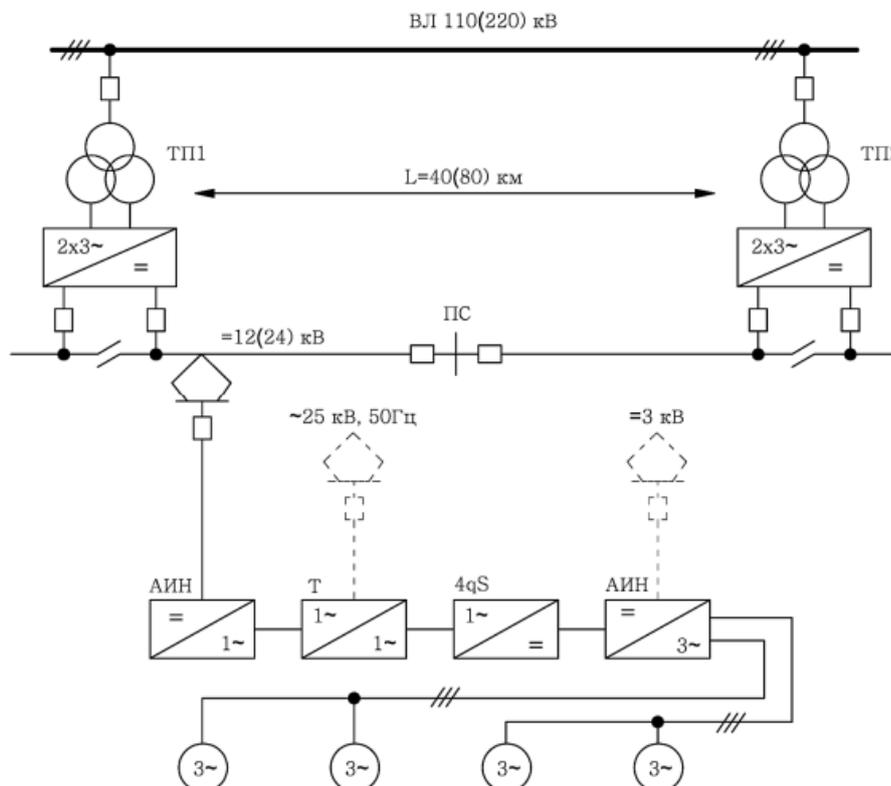


Рис. 8 – Система тяги постоянного тока 12(24) кВ

Исследованиями Доктора технических наук Б.Н. Тихменевым, ВНИИЖТ, показано, что энергетическая эффективность системы 25 кВ переменного тока соответствует энергетической эффективности системы постоянного тока 12 кВ [15].

Заключение

Использование систем тягового электроснабжения на постоянном токе повышенного напряжения 6, 12, 24 возможно по техническому устройству тяговых подстанций, однако необходимо разработать техническое решение, позволяющее преобразовать повышенное напряжение постоянного тока контактной сети в необходимого уровня питающее напряжение для тяговых электродвигателей подвижного состава. Необходима разработка высоковольтного преобразователя электрической энергии постоянного-постоянного тока и высоковольтного коммутационного оборудования на постоянном токе.

Необходимо разработать преобразовательный агрегат для тяговых подстанций, с возможностью минимизации их реконструкции, с возможностью применения на существующих силовых трансформаторах. С помощью существующих технических решений создать устройство, способное обеспечить лучший уровень электромагнитной совместимости, низкий уровень потерь и полное использование электрического потенциала питающей сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. транспорта. - Стереотипное издание. Перепечатка с издания 1986 г. – М.: Альянс, 2015. – 319 с.
- 2 Брагин В.А. Схемы питания потребителей электроэнергии от тяговых подстанций систем тягового электроснабжения постоянного тока 3,3 кВ, переменного тока 1x25 и 2x25 кВ и схема внешнего электроснабжения электрических железных дорог. Иркутск – 2010.

- 3 Мамошин Р.Р. Новые технологии электроснабжения железных дорог на переменном токе [Текст] // www.eav.ru, Евразия Вести IV- 2007.
- 4 Аржанников Б.А., Урманов Р.Н., Васильев И.Л. , Фишлер Я.Л., Виноградов А.В. Вольтодобавочные устройства тяговых подстанций // Электрическая и тепловозная тяга. - 1989. -№8. - С.44-46.
- 5 Железнодорожный транспорт за рубежом. Обзор. Вып. 3. М.: ЦНИИТЭИ, 1989. 137 с.
- 6 Зарубин А.Д. Анализ систем тягового электроснабжения [Электронный ресурс] / Зарубин А. Д., Астраханцев Л. А. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2021. — №2. — Режим доступа: <http://mnv.irkups.ru/toma/212-2021>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ. (дата обращения: 27.11.2023)
- 7 Маквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. – М. : Транспорт, 1965. – 464 с.
- 8 Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.
- 9 Выпрямительный и выпрямительно-инверторный агрегаты с регулированием выходного напряжения для тяговых подстанций / В. В. Руденский, Т. П. Добровольский, В. А. Зимаков, и др. / под ред. А. Б. Косарева // Новое в хозяйстве электроснабжения. – М. : Интекст, 2003. – 143 с.
- 10 Аржанников Б. А., Немытых Л. Н. Усиление системы электроснабжения постоянного тока // Транспорт Урала. – 2006. – №1 – С. 2–8
- 11 Курбасов А. С. Электрическая тяга постоянного тока повышенного напряжения // Железнодорожный транспорт. – 1985. – № 7. – С. 58–60.
- 12 Розенфельд В. Е. Применение постоянного тока высокого напряжения для электрической тяги / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога // Железнодорожный транспорт. – 1962. – № 7. – С. 35–39.
- 13 А.С. 152894 СССР, МКИ В61М, Кл.20 к.5. Система электроснабжения электрических железных дорог / Т. П. Третьяк (СССР) // Открытия. Изобретения. – 1963. – № 3.
- 14 Бурков А. Т. Система электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения / А. Т. Бурков, В. Н. Пупынин, Е. Т. Чернов // Всероссийская конференция «Параметры перспективных транспортных систем России» : тез. докл. – М. : 1994. – С. 54.
- 15 Тихменев Б. Н., Горин Н. Н., Кучумов В. А. Электрическая тяга постоянного тока: Возможности усиления // Железнодорожный транспорт. – 1987. – № 7. – С. 48–50.

BIBLIOGRAPHIC LIST

- 1 Bey Yu.M., Mamoshin R.R., Pupynin V.N., Shalimov M.G. Traction substations / Textbook for universities of railway transport. - Stereotypical edition. Reprint from the 1986 edition – Moscow: Alliance, 2015. – 319 p.
- 2 Bragin V.A. Power supply schemes for electricity consumers from traction substations of 3.3 kV DC traction power supply systems, 1x25 and 2x25 kV alternating current and external power supply scheme for electric railways. Irkutsk – 2010.
- 3 Mamoshin R.R. New technologies of power supply of railways on alternating current [Text] // www.eav.ru ., Eurasia Vesti IV- 2007.
- 4 Arzhannikov B.A., Urmanov R.N., Vasiliev I.L., Fischler Ya.L., Vinogradov A.V. Voltage-boosting devices of traction substations // Electric and diesel traction. - 1989. - No. 8. - pp.44-46.
- 5 Railway transport abroad. Review. Issue 3. Moscow: TSNIITEI, 1989. 137 p.
- 6 Zarubin A.D. Analysis of traction power supply systems [Electronic resource] / Zarubin A.D., Astrakhantsev L. A. // Young Science of Siberia: electron. scientific journal — 2021. — No. 2. — Access mode: <http://mnv.irkups.ru/toma/212-2021> , free. — Blank from the screen. — Yaz. rus., Eng. (accessed: 11/27/2023)
- 7 Makvardt K. G. Power supply of electric railways. – М. : Transport, 1965. – 464 p.

- 8 Arzhannikov B. A. Controlled power supply system of electrified DC railways: monograph / B. A. Arzhannikov. – Yekaterinburg : UrGUPS, 2010. – 176 p.
- 9 Rectifier and rectifier-inverter units with output voltage regulation for traction substations / V. V. Rudensky, T. P. Dobrovolskis, V. A. Zimakov, et al. / edited by A. B. Kosarev // New in the power supply economy. – M. : Intext, 2003. – 143 p.
- 10 Arzhannikov B. A., Nemytykh L. N. Strengthening of the DC power supply system // Transport of the Urals. - 2006. – No. 1 – p. 2-8
- 11 Kurbasov A. S. High-voltage DC electric traction // Railway transport. – 1985. – No. 7. – pp. 58-60.
- 12 Rosenfeld V. E. The use of high-voltage direct current for electric traction / V. E. Rosenfeld, V. V. Shevchenko, V. A. Mayboga // Railway transport. – 1962. – No. 7. – pp. 35-39.
- 13 A.S. 152894 USSR, MKI V61M, K1.20 K.5. Electric railway power supply system / T. P. Tretyak (USSR) // Otkritie. Inventions. – 1963. – No. 3.
- 14 Burkov A. T. High-voltage DC power supply system / A. T. Burkov, V. N. Pupynin, E. T. Chernov // All-Russian Conference "Parameters of promising transport systems of Russia" : tez. dokl. - M. : 1994. – p. 54.
- 15 Tikhmenev B. N., Gorin N. N., Kuchumov V. A. DC electric traction: Amplification possibilities // Railway transport. – 1987. – No. 7. – pp. 48-50.

Информация об авторах

Зарубин Андрей Денисович – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: amashi99@yandex.ru

Астраханцев Леонид Алексеевич – д.т.н., профессор кафедры Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Тихомиров Владимир Александрович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой Электроэнергетика транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск; e-mail: svat_irk@mail.ru

Informations about the authors

Zarubin Andrey Denisovich – graduate student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: amashi99@yandex.ru

Astrakhantsev Leonid Alekseevich – Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Electric Power Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: astrahancev1943@mail.ru

Tikhomirov Vladimir Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Power Engineering of Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk; e-mail: svat_irk@mail.ru