



# Мировые тенденции тягового электроснабжения



Василий БЕКРЕНЕВ

Vassily Yu. BEKRENEV

**Электрификация железных дорог стала неотъемлемой частью перевозочного процесса. Повышение массы поезда, увеличение мощности локомотивов влечет за собой усиление тягового электроснабжения, поиск новых эффективных схем управления транспортной энергетикой.**

*Ключевые слова: электрификация, железные дороги, ретроспектива развития, мировые тенденции, отечественный опыт.*

*Бекренев Василий Юрьевич — аспирант кафедры «Энергоснабжение электрических железных дорог» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), электромеханик Панковской дистанции электроснабжения Московской железной дороги.*

Из истории известно, что задолго до появления первых электрифицированных железных дорог в России проводились опыты по созданию электрической тяги. Этой теме посвящены исследования Б. С. Якоби, Ф. А. Пироцкого, Г. О. Графтио и других ученых. Начало развитию комплекса научно-исследовательских работ в области электрификации железнодорожного транспорта было положено в СССР Научно-экспериментальным институтом путей сообщения (ныне ВНИИЖТ).

Ретроспекция направлений научно-технической деятельности, связанной с электрификацией железных дорог, включает:

- научное обоснование генерального плана электрификации железнодорожной сети страны;
- выбор систем тягового электроснабжения для электрифицированных участков дорог;
- вопросы стыкования систем тягового электроснабжения;
- научно-техническое обоснование перевода участков железных дорог с постоянного на переменный ток;
- создание высокоэффективной преобразовательной техники электроснабжения тяги и другого электрооборудования;

Таблица 1

## Электрификация железных дорог мира и системы электрической тяги

|  | Электрифициро-<br>вано на перемен-<br>ном токе,<br>тыс. км | Электрифициро-<br>вано на постоян-<br>ном токе,<br>тыс. км | Эксплуатацион-<br>ная длина<br>электрифициро-<br>ванных линий,<br>тыс. км | Эксплуатацион-<br>ная длина<br>железных<br>дорог мира,<br>тыс. км |
|--|--|--|---|---|
| 1  | 2  | 3  | 4   | 5   |
| Европа<br>(без ОАО «РЖД»);<br>% от сети      | 80,9<br>51,3%  | 45,1<br>44,6%  | 126,0<br>48,7%  | 253,9<br>27,5%  |
| Азия<br>(без ОАО «РЖД»);<br>% от сети        | 45,8<br>29,1%  | 29,1<br>28,8%  | 75,0<br>28,9%   | 213,8<br>23,1%  |
| Россия<br>(ОАО «РЖД»);<br>% от сети          | 24,7<br>15,7%  | 18,5<br>18,3%  | 43,2<br>16,7%   | 85,3<br>9,2%  |
| Африка;<br>% от сети                         | 4,5<br>2,8%  | 6,8<br>6,8%  | 11,3<br>4,4%  | 57,5<br>6,2%  |
| Америка;<br>% от сети                        | 1,7<br>1,1%  | 1,6<br>1,6%  | 3,3<br>1,3%   | 313,3<br>33,9%  |
| Итого по<br>сети, тыс. км;%<br>от ж. д. мира | 157,6<br>17,1%   | 101,3<br>11,0%   | 258,8<br>28,0%  | 923,7   |

- комплекс задач по применению рекуперации энергии на электрифицированных дорогах;

- разработку разных типов контактных подвесок и их компонентов;

- обеспечение надежного токосъема, в том числе при наличии скоростного и высокоскоростного движения;

- телемеханизацию устройств электроснабжения;

- внедрение ресурсосберегающих технологий;

- подготовку нормативных документов;

- разработку энергетической стратегии отрасли вплоть до 2020 года и др.

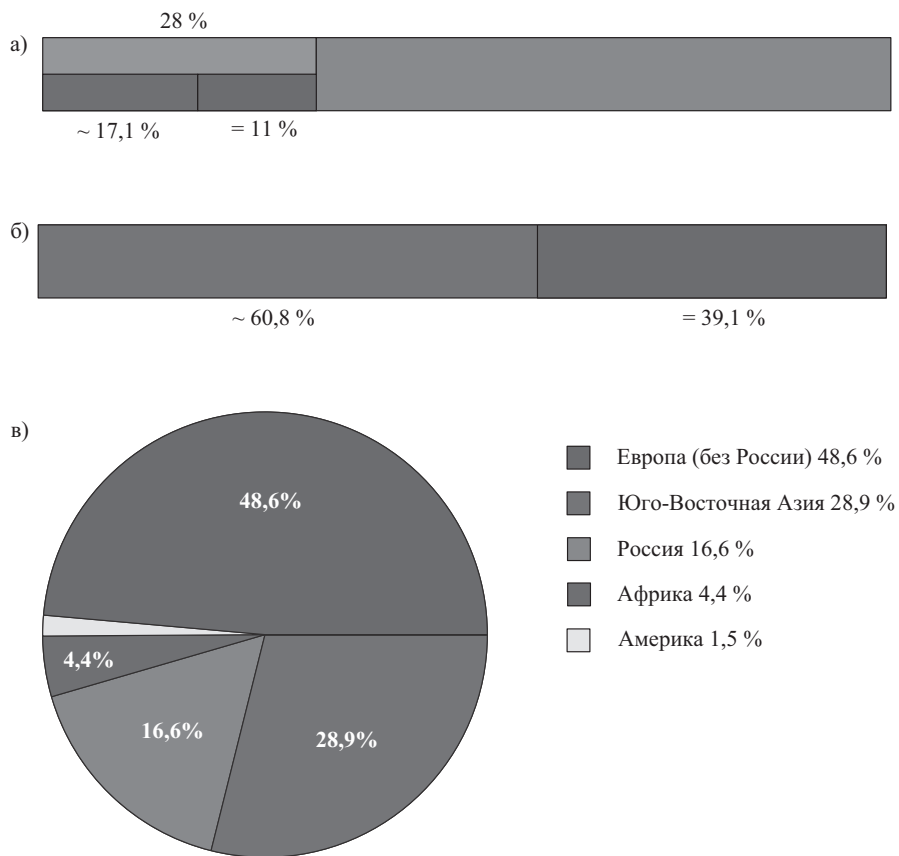
Над решением этих проблем работали выдающиеся ученые Б. Н. Тихменев (электроподвижной состав, электропривод), И. И. Власов (контактная сеть и токосъем), М. А. Чернышов, С. Д. Соколов (преобразователи тяговых подстанций), В. Д. Радченко (защита от перенапряжений), Н. Д. Сухопрудский (системы телемеханики), А. И. Гуков (контактная сеть), Р. И. Мирошниченко (электроснабжение), Р. Р. Мамошин (тяговое электроснабжение) и многие другие специалисты. Сегодня в сфере электрификации и электроснабжения железных дорог начатое ими дело продолжают их последователи. Преемственность научных школ подтверждают, в частности,

международные симпозиумы, регулярно проходящие в Московском и Санкт-Петербургском государственных университетах путей сообщения.

Электрифицированные железнодорожные линии относятся к эффективному, экономичному и экологически чистому виду транспорта. В сравнении с тепловозной тягой перевозки грузов здесь на 25–30% дешевле. Электрическая тяга занимает ведущее место в объемах перевозок на железных дорогах мира. За счет этого обеспечивается значительная экономия топливно-энергетических ресурсов. Грузонапряженность при наличии электрической тяги гораздо выше, чем при использовании тепловозной (рис. 1, таблица 1).

На железных дорогах эксплуатируется более десятка систем электрической тяги. Наиболее распространены системы переменного тока 25 кВ, 2х25 кВ с частотой 50 Гц и 15 кВ с частотой 162/3 Гц, а также постоянного тока 3 кВ и 1,5 кВ.

Нетрадиционная система тяги переменного тока с напряжением 50 кВ в контактной сети и на ЭПС повышает провозную способность в два раза и увеличивает расстояние между тяговыми подстанциями до 80–100 км. Ведутся поиски вариантов совершенствования системы тягового электроснабжения напряжением 94 кВ



**Рис. 1.** Число электрифицированных линий от общей длины железных дорог в мире, % (а); в т.ч. электрифицированных линий на переменном и постоянном токе, % (б); эксплуатационная длина электрифицированных линий в мире, % (в)

на переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

Внедрение электрической тяги в СССР началось в 20-е годы прошлого века. В 1926 году впервые электрифицирован участок Баку–Сабунчи Азербайджанской железной дороги протяженностью 19 км, он использовался для доставки бригад нефтяников на Апшеронский полуостров. Напряжение в контактной сети составляло 1200 В постоянного тока. В тридцатые годы участок был переведен на напряжение 1650 В, затем – 3300 В. Преобразование переменного тока в постоянный на подстанциях осуществлялось вращающимися одноякорными преобразователями. Контактная подвеска – цепная, полукompенсированная, М-120+МФ-100. Изоляторы зарубежного производства, подвижной состав – специальные вагоны постройки Мытищинского вагоностроительного завода.

В 1929 году электрифицирован участок Москва – Мытищи Северной железной дороги. Линия питалась постоянным током напряжением 1650 В, преобразователи – ртутные выпрямители. Контактная подвеска – цепная, полукompенсированная, Бр-120+МФ-100, усиливающий провод 2 М-95, опоры – деревянные из хвойных пород, консоли гнутые, изоляторы одинарные типа П-4,5. Подвижной состав поначалу включал электросекции серий Св, Сд, Ср и электровозы серий С, Си, Сс, в последующие годы – ВЛ19, ПБ, СК, ВЛ22 и другие. Полоза токоприемников были с медными накладками. На участке до Мытищ построены две тяговые подстанции. Максимальный износ контактных проводов наступал через 5–7 лет эксплуатации.

До 1935 года в контактной сети постоянного тока был «минус», в рельсах – «плюс». Такая схема электроснабжения

тяги вызывала износ (электрокоррозию) в путевом хозяйстве костылей, подошв рельс. По требованию хозяйства произведена переполюсовка контактной сети на тяговых подстанциях. В сеть подана фаза «плюс», в рельс — фаза «минус», и такой порядок сохраняется до настоящего времени. В этом случае на электрифицированных участках постоянного тока все проблемы электрокоррозии подземных сооружений остаются за хозяйством электрификации и электроснабжения.

В 30-е годы были разработаны ртутные преобразователи на 1650 В и затем на 3300 В. В послевоенный период с 1947 по 1961 год на дорогах постоянного тока проводились работы по повышению уровня напряжения в контактной сети до 3 кВ с сохранением подвижного состава. На сети монтировались временные нейтральные вставки, на ЭПС — схемы включения двигателей.

Контактная сеть постоянного тока внедрялась на многих пригородных направлениях крупных городов. Однако постоянный ток не давал возможности электрифицировать прилегающие к железной дороге города и села, что сдерживало экономику послевоенного периода. Кроме того, сетевая специфика требовала большого расхода цветных металлов, способствовала электрокоррозии подземных сооружений.

В целях повышения эффективности постоянного тока 3 кВ Уральским отделением ВНИИЖТ разработана система усиления участков сети с помощью промежуточных тиристорных преобразовательных пунктов, питаемых от тяговых подстанций постоянным током 6,6 кВ, что улучшает режим напряжения и снижает потери энергии.

В последние годы специалистами Уральского государственного университета путей сообщения создан преобразователь постоянно-постоянного тока 6/3 кВ на современных силовых полупроводниковых приборах. Новая схема частично реализована на Свердловской железной дороге.

В 1955 году в СССР электрифицирован первый участок контактной сети Ожерелье—Павелец Московско-Курской и Донбасской железных дорог напряжением 22 кВ на однофазном переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

Внедрение переменного тока потребовало организации стыкования постоянного и переменного тока на ст. Ожерелье. На участке Ожерелье—Павелец протяженностью 130 км построили три тяговые подстанции.

В 1959 году уровень напряжения в контактной сети был поднят до 25 кВ.

Роль ЭПС исполняли электровозы типа НО (Новочеркасский, однофазный) и французские электровозы типа «F». Сейчас первый отечественный электровоз НО-001 переменного тока в качестве реликвии стоит в локомотивном депо Ожерелье Московской железной дороги.

На электрифицированных участках переменного тока ставилась задача обеспечить электроснабжение нетяговых промышленных потребителей, городов и сел на расстоянии не менее 25 км от железнодорожной трассы.

Совершенствование системы переменного тока продолжалось и в последующее время. В 1979 году был введен в эксплуатацию новый электрифицированный участок Вязьма — Орша Московской и Белорусской железных дорог по системе переменного тока 2×25 кВ, 50 Гц, в которой передача электроэнергии осуществлялась питающим проводом напряжением 50 кВ, а в контактной сети через автотрансформаторы сохранялся уровень напряжения 25 кВ. Протяженность участка составила 296 км. Система тягового электроснабжения 2×25 кВ не требует изменения ЭПС, значительно увеличивает расстояния между тяговыми подстанциями, снижает влияние тяговой сети на линии связи, позволяет использовать коммутационную и защитную аппаратуру, принятую для переменного тока 25 кВ.

Оригинальность системы 2×25 кВ заключается в следующем: на тяговой подстанции две обмотки тяговых трансформаторов (напряжение в каждой из них 25 кВ) соединяют последовательно и среднюю точку подключают к рельсам, а два ее вывода — к контактному проводу и дополнительному питающему проводу, проложенному по опорам контактной сети. Отдельный провод имеет напряжение по отношению к рельсу 25 кВ, а между ними — 50 кВ. На межподстанционной зоне через 10–15 км устанавливаются автотрансформа-



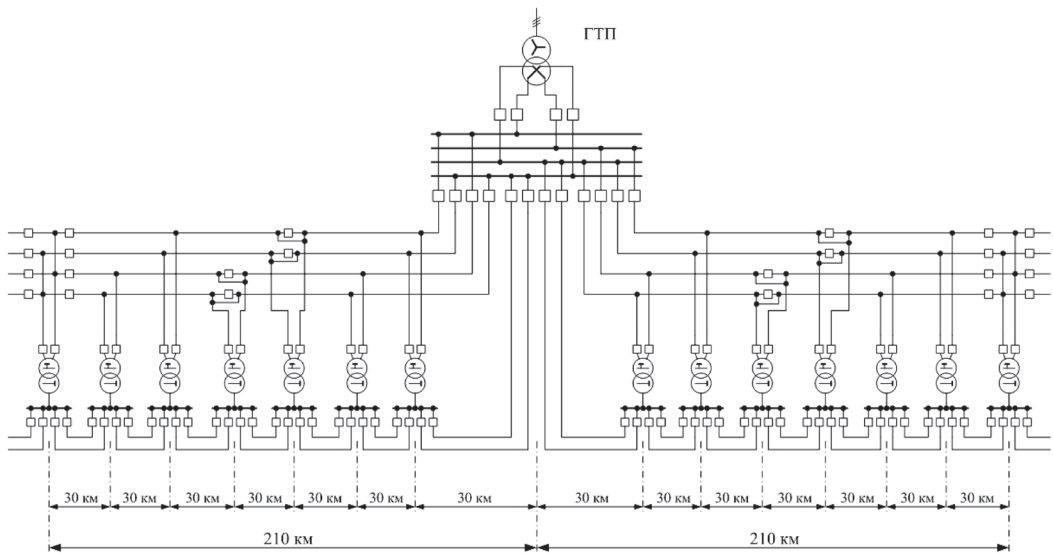


Рис. 2. Система тягового электроснабжения переменного тока повышенного напряжения 94 кВ.

торные пункты, подключаемые к проводам контактной сети и питающему проводу; средняя точка автотрансформаторов присоединяется к тяговым рельсам.

За сравнительно короткое время таким способом было электрифицировано более 3 тыс. км. Основными показателями эффективности системы тягового электроснабжения  $2 \times 25$  кВ являются:

- снижение затрат на внешнее электроснабжение тяговых подстанций;
- уменьшение затрат на защиту линий связи от электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока (в 4–5 раз);
- снижение потерь напряжения и энергии в тяговой сети на 10–15%;
- возможность поэтапного наращивания энергетической обеспеченности электрической тяги, а при необходимости и ее понижения – например, при спаде объемов перевозок;
- ресурсы преобразования в систему 25 кВ с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Учитывая эффективность систем тягового электроснабжения 25 кВ,  $2 \times 25$  кВ переменного тока, впервые в мировой практике в 1995 году был осуществлен перевод с постоянного тока на переменный участок Зима – Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги (386 км). В 2001 году переведен на переменный ток участок Мурманск – Лоухи (около 500 км), в последующем – линии в пригородах

Волгограда, Саратова и другие участки, ранее электрифицированные на постоянном токе.

Ныне в стране нет альтернативы электрификации железных дорог на переменном токе промышленной частоты напряжением 25 кВ. Это совпадает и с мировой тенденцией относительно выбора системы электрической тяги.

Специалисты модернизируют систему  $2 \times 25$  кВ, добиваются повышения напряжения питающего провода до 65 кВ при сохранении напряжения 25 кВ в контактной сети и на ЭПС. В результате энергия к поездам подается напряжением 90 кВ ( $65 + 25$  кВ). Провозная способность такой системы повышается в 2,8 раза, расстояния между тяговыми подстанциями достигает 130–140 км.

Ученые МИИТ с участием коллег из ВНИИЖТ расширяют зону экспериментов, связанных с тяговым электроснабжением переменного тока. К питающему проводу 65 кВ вводится еще один провод с напряжением 25 кВ. Образованная линия продольного электроснабжения 90 кВ прокладывается по опорам контактной сети, с отбором мощности для тяги по традиционной схеме – трансформаторами 90/25 кВ. Головные тяговые подстанции располагаются через 200–300 км, обеспечивая с помощью симметрирующих трансформаторов отбор электроэнергии от энергосистем при минимальной несимметрии тяговых нагрузок.

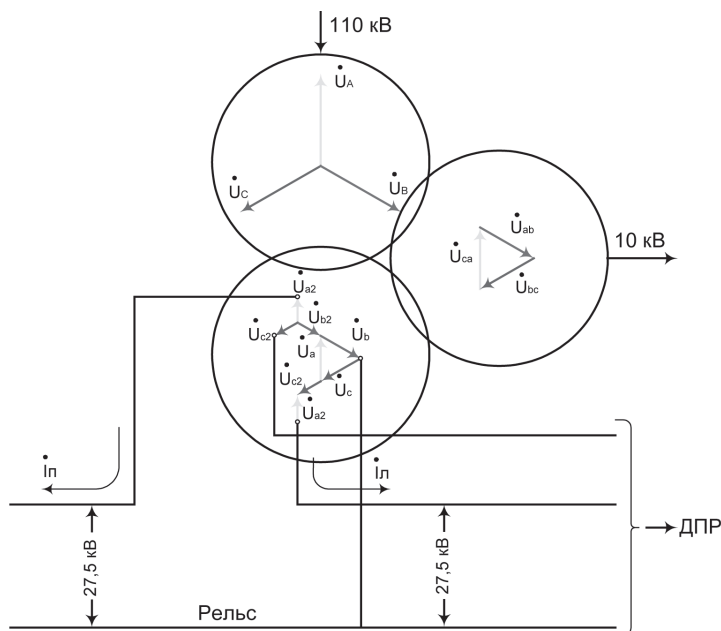


Рис. 3. Схема симметрирующего трансформатора, установленного на тяговой подстанции Нюхча (ЭЧ Кемь) Октябрьской железной дороги.

В последние годы активно рассматривается система тягового электроснабжения переменного тока напряжением 94 кВ (рис. 2). Основные требования, предъявляемые к ее элементам и рабочим характеристикам:

- система должна иметь минимум выходов на сеть общего назначения с расстояниями между ними в пределах 180–360 км;
- выходы на сеть общего назначения должны осуществляться с помощью головных тяговых подстанций (ГТП), оснащаемых специальными трёхфазными симметрирующими трансформаторами;
- задача трансформаторов – формирование напряжений 27,5 кВ плеч питания контактной сети слева и справа от ГТП, сдвинутых относительно друг друга на 90° (эффект Скотта), и формирование выводов высокого напряжения для питания промежуточных тяговых подстанций (ПТП) через специальные двухпроводные питающие линии (ДПЛ) напряжением 94 кВ, подвешиваемые на опорах контактной сети;
- напряжения ДПЛ, прокладываемых слева и справа, также должны быть сдвинуты между собой на 90°;
- на интервалах между ГТП питание контактных подвесок осуществляется

от ПТП, оснащённых однофазными трансформаторами мощностью не более 16–25 МВА;

- расстояния между ПТП в зависимости от профиля пути и размеров движения должны оставаться в пределах 20–30 км;
- ПТП слева и справа от ГТП должны работать на контактную сеть параллельно, как тяговые подстанции (ТП) на участках постоянного тока 3 кВ – это позволит исключить посты секционирования и ограничиться сооружением нейтральных вставок только в контактной сети у ГТП.

При этой системе на участках протяжённостью 180–360 км коммерческий учёт будет осуществляться с помощью комплектов счётчиков активной и реактивной энергии. Обращает на себя внимание и то, что никаких специальных средств для симметрирования тяговых нагрузок в узлах их выхода в сеть общего назначения применять не требуется, ибо большие расстояния между ГТП ведут к выравниванию тяговых нагрузок, питаемых слева и справа от головных подстанций, и сведению несимметрии токов, потребляемых ГТП, практически к нулю.

Общая ситуация, если итожить тенденции, складывается однонаправленно.





В мировой практике выбор систем тягового электроснабжения остается за переменным током напряжением 25 кВ в контактной сети (это наиболее эффективный и экономически обоснованный уровень напряжения), а также сохраняется действующий электроподвижной состав, не усложняется электробезопасность обслуживающего персонала. Применение других уровней напряжения в контактной сети имеет частный характер.

Системы тягового электроснабжения постоянного тока тоже продолжают существовать, хотя закрепилась тенденция перехода на переменный ток там, где это экономически обосновано, целесообразно и реально возможно.

Причем все настойчивее заявляют о себе системы тягового электроснабжения напряжением 94 кВ с симметрирующими трансформаторами, собираемыми по схеме МИИТ. Такая схема обеспечивает:

– снижение несимметрии токов (напряжений) на вводах сетей внешнего электроснабжения к тяговым подстанциям в 2,3–3,5 раза (а при равномерной нагрузке сводит её к нулю);

– снижение потерь в меди обмоток, что при средней нагрузке трансформаторов приводит к экономии свыше 2 млн кВт/ч в год на участке протяженностью 300–360 км;

– использование симметрирующих трансформаторов без «винтового» присоединения к сетям внешнего электроснабжения.

Исследования, проведенные Санкт-Петербургским государственным университетом путей сообщения на тяговой подстанции Нюхча (ЭЧ Кемь) Октябрьской железной дороги (рис. 3) [4], подтверждают

повышение симметрирующего эффекта трансформаторов до 6,1%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мамошин Р.Р. Разработка новой системы тягового электроснабжения железных дорог переменного тока повышенного напряжения 94 кВ с симметрирующим эффектом электрической тяги: Отчет о научно-исследовательской работе. – М.: МИИТ, 2004.
2. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. Утверждены МПС России 11 декабря 2001 г. – М.: Трансиздат, 2006.
3. Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. – М.: Энергосервис, 2003.
4. Исследования качества отбора электроэнергии из системы внешнего электроснабжения на тяговой подстанции ЭЧЭ-85 «Нюхча» с симметрирующими трансформаторами типа ТМТНЖСМ-25000/110 УХЛ1/ПГУПС. – СПб., 2005.
5. Правила безопасности при эксплуатации контактной сети и устройств электроснабжения автоблокировки железных дорог ОАО «РЖД». Утверждены 16 декабря 2010 г., № 103. – М.: Трансиздат, 2010.
6. Инструкция по безопасности при эксплуатации электроустановок тяговых подстанций и районов электроснабжения железных дорог. Утверждена ОАО «РЖД» 17.03.2008 г., № 4054. – М.: ТЕХИНФОРМ, 2008.
7. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. – М.: Транспорт, 1986.
8. Бондарев Н.А., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. – М.: Маршрут, 2006.
9. Бородулин Б.М., Герман Л.А., Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1983.
10. Василянский А.М., Мамошин Р.Р., Якимов Г.Б. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц.
11. Мамошин Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока. – М.: Транспорт, 1973.
12. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. – М.: Интекст, 2002.
13. Электрифицированные железные дороги России 1929–2004/Под общ. ред. П.М. Шилкина. – М.: Интекст, 2004.
14. Барбачков А.С. Релейная защита системы тягового электроснабжения 94 кВ/Дис... канд. техн. наук. – Хабаровск, 2009.
15. Захарьев Ю.Д., Лосев В.Г. Хозяйство электрификации: вклад в будущее//Локомотив. –2012. – № 1. ●

## TRACTION POWER SUPPLY: WORLD TRENDS

**Bekrenev, Vassily Yu.** – Ph.D. student at the department of power supply of electric railways of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), electrician of Panki distance of power supply of Moscow railway.

*Electrification of railways is an integral part of traffic process. Train weight growth, locomotive capacity enhancement cause growing need for electric traction supply, explain a permanent search for new efficient patterns of transport power engineering management.*

Key words: electrification, railways, retrospective of developments, world trends, Russian experience.

Координаты автора (contact information): Бекренев В. Ю. – 499–262–27–60.